FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNEE 1970

THÈSE

POUR LE

N° 309

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'État)

PAR

BATOUT GUY

Ancien Externe des Hôpitaux de PARIS
Né le 4 Octobre 1939 à TALENCE

Présentée et soutenue publiquement le ... *19*

L'APPAREIL VESTIBULAIRE

ET

L'ABSENCE DE PESANTEUR

Président : M. AUBRY , Professeur

A M O N P E R E

A M A M E R E

A M A F A M I L L E E T A

L A M E M O I R E D E S E S D I S P A R U S

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

A L A M E M O I R E D U D O C T E U R

F R A N C O I S G I L L A R D

A M E S A M I S

A M O N S I E U R L E P R O F E S S E U R

M A U R I C E A U B R Y

Professeur de la Clinique

Oto-Rhino-Laryngologique de la Faculté de Médecine de Paris

Qui nous a fait l'honneur de bien vouloir présider
cette thèse

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549218_0016

A M O N S I E U R L E P R O F E S S E U R

A G R E G E P A U L P I A L O U X

Qui nous a inspiré ce travail et
nous a aidé dans sa rédaction

A M E S M A I T R E S D E S H O P I T A U X

D E P A R I S

- MONSIEUR LE PROFESSEUR R. JUDET
- MONSIEUR LE DOCTEUR A. MOUCHET
- MONSIEUR LE DOCTEUR M. MORIN
- MONSIEUR LE DOCTEUR M. ISRAEL-ASSELIN
- MONSIEUR LE PROFESSEUR J. LEROUX-ROBERT
- MONSIEUR LE DOCTEUR J.R. MERCIER
- MONSIEUR LE PROFESSEUR M. AUBRY

A T O U S C E U X Q U I M' O N T

I N S T R U I T E T F O R M E

I N T R O D U C T I O N

Depuis toujours l'homme se trouve inéluctablement soumis aux effets de l'accélération de la pesanteur.

Celle-ci intervient tout spécialement pour les déplacements globaux ou segmentaires du corps, pour l'orientation dans l'espace et l'équilibration.

D'ailleurs, certains esprits finalistes ont pu affirmer que la dépendance vis à vis de cette force représente une des caractéristiques de la cellule vivante.

Mais il était impossible de juger de la valeur exacte de ce facteur d'ambiance en raison de son intervention constante dans la vie terrestre et en raison de l'impossibilité où nous nous trouvions de l'exclure.

Il a fallu attendre le 20^{e} siècle afin d'observer le comportement d'individus vivants qui ne sont plus soumis à cette loi : l'aviation tout d'abord dans certaines conditions bien précises permet de réaliser des périodes fort brèves de non pesanteur. Des expérimentateurs ingénieux tentent de reproduire un tel phénomène. Enfin l'avénement récent des vols orbitaux et spatiaux au cours desquels le cosmonaute demeure plusieurs heures puis plusieurs jours en état d'apesanteur.

Cette ambiance de vie absolument neuve est un sujet d'étude à juste titre passionnant. Ainsi, pour la première fois, l'otologiste se voit-il offert la possibilité d'étudier de quelle manière vont se comporter dans ce nouveau milieu les formations anatomiques dont le stimulus est la pesanteur. Un état pathologique nouveau est-il créé ? Le vestibule se trouve-t-il en présence d'un état qui, bien qu'inhabituel n'en reste pas moins physiologique ? Comment se comportent les autres fonctions de l'équilibre ?

Autant de questions dont les réponses ont pesé lourd avant d'entreprendre et de poursuivre l'envoi d'hommes dans l'espace.

Le but de ce travail est donc :

- de rapporter les observations qui ont été publiées à ce sujet et les conclusions des observateurs directs.
- d'ébaucher un essai de synthèse.

D'emblée se font jour les insuffisances et les faiblesses de notre travail :

Absence d'observations directes pour des motifs faciles à comprendre, observations de courte durée et non suivies d'un recul suffisant (il ne s'est pas écoulé 10 années depuis le lancement du premier homme dans l'espace). A celà nous ajouterons : la parcimonie avec

laquelle sont publiés les résultats, l'atmosphère de secret qui bien souvent entoure les travaux en ce domaine.

Il est bien certain qu'une fois achevé l'esprit de compétition qui anime la conquête spatiale et terminée l'époque héroïque, des études plus précises et bien codifiées seront possibles comme il en fut dans le domaine de l'aviation.

Le dénuement de notre travail n'en sera alors que plus flagrant.

Notre unique but est donc de faire le point du comportement de l'appareil vestibulaire dans l'état d'apesanteur et ses incidences sur la fonction de l'équilibre, à la lumière des premiers renseignements.

Le plan de notre travail est le suivant :

= Rappel de l'anatomie puis de la physiologie de l'appareil vestibulaire.

= Les méthodes d'exploration de l'appareil vestibulaire.

= Résumé de la physio pathologie de l'équilibre chez l'aviateur.

= Les principales techniques utilisées pour réaliser un état d'apesanteur.

= Les observations publiées à propos de la physio pathologie vestibulaire en état d'agravité :

- chez l'animal
- chez l'homme en dehors des vols spatiaux
- chez l'homme au cours des vols spatiaux

= Les premières notions à propos des stations orbitales tournantes.

= Conclusions.

ANATOMIE DE L'APPAREIL VESTIBULAIRE

Pairs et symétriques, les organes de l'appareil vestibulaire sont situés dans le labyrinthe postérieur.

Celui-ci comprend : le vestibule, les canaux semi-circulaires, l'aqueduc du vestibule.

Il est situé à l'intérieur de la pyramide pétreuse, en arrière du labyrinthe antérieur où se trouve l'appareil cochléaire.

Il est constitué du labyrinthe osseux ou capsule otique et du labyrinthe membraneux, le premier constituant une coque d'os compact autour du second, une sorte de carter, il en épouse tous les contours mais en reste séparé par les espaces lymphatiques.

Rappel d'embryologie :

Le labyrinthe membraneux se constitue le premier à partir de la vésicule auditive du 25^{e} jour au 75^{e} jour de la vie de l'embryon. Au niveau de son extrémité dorsale se produisent deux phénomènes : évaginations et accolement, plus résorption. Le canal endolymphatique s'individualise en premier puis le canal semi-circulaire supérieur, puis le postérieur enfin l'externe.

Le labyrinthe osseux dérive du mesenchyme qui entoure le labyrinthe membraneux et se différencie dès la 6^{e} semaine en deux couches : profonde ébauche des espaces périlymphatiques et de leur contenu liquidien, superficielle précartilagineuse.

Vers la 8^{e} semaine apparait le modèle cartilagineux tapissé d'une couche externe et d'une couche interne de périchondre. Ensuite, la couche interne subit une ossification de type périchondral pour former l'endoste du labyrinthe osseux. La couche externe subit une ossification du même type pour constituer l'os pétreux proprement dit. La couche moyenne possède une double origine intra chondrale et enchondrale qui prend fin juste avant le terme.

Les voies vestibulaires dérivent de l'ébauche du ganglion de Scarpa qui s'est constituée à partir de la vésicule auditive. A partir du ganglion, des fibres centripètes, ébauches du nerf vestibulaire, pénètrent le tube neural.

Anatomie du labyrinthe postérieur osseux :

Le Vestibule :
En représente la partie centrale intercalée entre le conduit auditif interne et la caisse du tympan.

Forme ovoïde irrégulier plus haut que large. Ses parois sont creusées par les orifices des canaux semi-circulaires, l'abouchement du limaçon et de l'aqueduc du vestibule, les fenêtres ovale et ronde. En outre, ses parois sont perforées par de petits pertuis pour le passage des filets nerveux et groupés en taches criblées.

Le vestibule peut être comparé à un parallélépipède rectangle dont les grands côtés sont perpendiculaires à l'axe pétreux.

Dimensions : longueur 6 à 7 mm., hauteur 5 à 6 mm., largeur 2 à 3 mm.

= La paroi externe répond à la caisse du tympan, elle est légèrement convexe, creusée de 3 orifices: - la fenêtre ovale à la partie antéro-inférieure s'ouvrant en dehors dans la caisse, obturée par la platine de l'étrier.

- les deux orifices du canal semi circulaire externe : l'antérieur ampullaire elliptique à grand axe horizontal à 1 mm. au dessus de la fenêtre ovale, le postérieur non ampullaire circulaire.

= La paroi interne présente quatre dépressions et une crête :

La fossette semi-ovoïde ou utriculaire antéro-supérieure avec une tache criblée traversée par les filets du nerf utriculaire,

La fossette hémisphérique ou sacculaire antéro-inférieure avec une tache criblée pour les filets du nerf sacculaire. La crête du vestibule sépare ces 2 fossettes,

La fossette cochléaire postéro-inférieure, elle reçoit l'extrémité vestibulaire du canal cochléaire,

La gouttière sulciforme postéro-supérieure verticale aboutit en haut à l'orifice vestibulaire de l'aqueduc du vestibule.

= La paroi inférieure ou plancher se trouve creusée à ses deux extrémités :
- en arrière par l'orifice ampullaire du canal postérieur,
- en avant par l'abouchement de la rampe vestibulaire du limaçon.

Entre ces deux orifices, l'origine de la lame spirale qui n'atteint pas la paroi externe du vestibule. Au dessous de la lame spirale la cavité sous vestibulaire prolonge la rampe tympanique du limaçon, elle est creusée par la fenêtre ronde. Celle-ci est obturée à l'état frais par le tympan secondaire qui sépare la caisse du vestibule.

= La paroi supérieure ou toit étroite présente :
- en avant l'orifice ampullaire elliptique du canal semi-circulaire supérieur,
- en arrière l'orifice circulaire du canal commun des canaux verticaux.

= La paroi antérieure est très étroite.

- La paroi postérieure s'étend verticalement de l'orifice du canal commun à l'orifice ampullaire du canal postérieur.

Les Canaux Semi-circulaires

Ce sont des tubes cylindriques de 7 à 8 mm. de diamètre recourbés en fer à cheval et s'ouvrant dans le vestibule par leurs deux extrémités. Une des extrémités est dilatée en ampoule qui est le siège d'une tache criblée où cheminent les fibres des nerfs ampullaires.

Les Canaux, au nombre de trois, se distinguent en fonction de leur orientation en supérieur ou antérieur, externe ou horizontal et postérieur.

Dimensions :
Le plus court est l'externe : 15 mm., le plus long est le postérieur : 20 mm.
Leur section circulaire ou ovalaire a un diamètre qui varie entre 0,5 mm. et 1,5 mm. au niveau de l'ampoule.

Orientation :
Le plan du canal externe fait un angle de 30° avec le plan conventionnel de référence ou "Plan de Francfort" passant par le pôle supérieur du conduit auditif externe et le rebord orbitaire inférieur. Il est donc oblique en bas et en arrière.

Le plan du canal vertical fait un angle de 45° ouvert vers l'avant avec le plan sagittal et est ainsi presque perpendiculaire à l'axe du rocher.

Le plan du canal postérieur fait un angle de 45° ouvert vers l'arrière avec le plan sagittal et se trouve ainsi presque parallèle à l'axe du rocher.

Au total le canal supérieur d'un côté est dans le même plan que le canal postérieur controlatéral et les 3 canaux sont approximativement perpendiculaires entre eux. Il existe cependant de nombreuses variations individuelles, le plan du canal horizontal est souvent choisi comme plan horizontal de référence, c'est le plan ortho vestibulaire.

Description :
Le canal supérieur décrit un arceau au-dessus de toit du vestibule. Son orifice ampullaire est antérieur, l'orifice non ampullaire est commun avec celui du canal postérieur et est postérieur.

Le canal postérieur présente une boucle très fermée, son orifice ampullaire est dans l'angle postéro-inféro-externe du vestibule.

Le canal externe s'implante sur la paroi externe du vestibule, l'orifice ampullaire est à l'angle antéro-supérieur. L'orifice non ampullaire à l'angle portéro-supérieur entre l'orifice du canal commun au dessus et l'orifice ampullaire du canal postérieur au dessous et en dedans.

L'aqueduc du vestibule est un étroit canal qui prend son origine à l'extrémité de la gouttière sulciforme de la paroi interne du vestibule, il se dirige en arrière, en dedans et en bas pour déboucher à la face postéro supérieure du rocher au niveau de la fossette unguéale située 1 cm en arrière du conduit auditif interne.

Rapports du vestibule osseux :

La paroi externe du vestibule et le canal semi-circulaire externe répondent à la paroi interne de la caisse du tympan où chemine la 2° portion de l'aqueduc de Fallope, la boucle du canal dessine d'ailleurs un relief au dessus et en arrière de celui de l'aqueduc.

La paroi interne du vestibule répond à la moitié postérieure du conduit auditif interne en avant et à la corticale cérebelleuse en arrière.

Le plafond du vestibule et le canal supérieur répondent à la corticale pétreuse d'ailleurs très mince entre le sommet du canal et la dure-mère.

Le plancher répond à la fosse jugulaire qui peut être plus ou moins proche de l'ampoule du canal postérieur.

La paroi postérieure et le canal postérieur sont plus ou moins proches de la face cérebelleuse du rocher.

La paroi antérieure répond en haut à la première portion de l'aqueduc de Fallope et son premier coude, en bas, à la portion non enroulée du limaçon.

Entre labyrinthe et corticale, les espaces sont comblés par du tissu osseux spongieux et des cellules osseuses aérifères organisées en de véritables traînées cellulaires péri-labyrinthiques. Toutes ces traînées se réunissent en dedans du labyrinthe pour gagner l'apex pétreux en passant au-dessus du conduit auditif interne.

La vascularisation de la capsule otique est assurée par l'artère tympanique inférieure, l'artère stylo mastoïdienne, les branches de l'artère auditive interne et de l'artère occipitale.

ANATOMIE DU LABYRINTHE MEMBRANEUX :

Il est constitué de cavités à parois conjonctivo - épithéliales supportant les éléments sensoriels vestibulaires.

Il comprend trois canaux semi-circulaires s'ouvrant dans une cavité postéro-supérieure qui est l'utricule, elle-même en communication avec une autre cavité antéro-inférieure : le saccule. Le saccule communique avec le canal cochléaire, organe de l'audition, et avec le canal endo lymphatique renflé en sac à son extrémité laquelle est logée dans la fossette unguéale.

Ces différentes cavités sont emplies de liquide endolymphatique. Elles sont logées à l'intérieur du labyrinthe osseux, épousant sa forme mais elles n'occupent qu'incomplètement le carter osseux, baignant ainsi dans le liquide périlymphatique.

Structure des parois :

Une couche conjonctive périphérique et une couche épithéliale interne différenciée par endroits en zones sensorielles créant des reliefs sur la face interne. Ces zones sensorielles comprennent : des cellules de soutien, des cellules sensorielles ciliées, une membrane anhiste extracellulaire en rapport intime avec les cils des cellules sensorielles.

Elles sont représentées par : les macules utriculaire. et sacculaire, les crêtes ampullaires des canaux.

La macule utriculaire ou lapillus : située sur le plancher et la paroi antérieure de l'utricule à peu près dans un plan horizontal.

La macule sacculaire ou Sagittae : de forme triangulaire, située sur la face profonde du saccule dont elle épouse l'orientation dans un plan sagittal.

Les macules sont formées : d'une couche de cellules de soutien supportant les cellules sensorielles disposées en mosaïque, d'une membrane extra-cellulaire ou membrane otolithique, agglomérat de particules cristallines de 1 à 10 µ (les otoconies) séparées des cellules ciliées, le poids spécifique de l'otolithe est trois fois supérieur à celui du liquide endo-lymphatique.

Les crêtes ampullaires des canaux : une crête par canal, chacune est située à la partie antérieure de l'ampoule sur un repli osseux transversal de forme semi-lunaire perpendiculaire à l'axe du canal. Ainsi, les crêtes externes sont dans un même plan ainsi que les crêtes postérieures d'un côté et supérieure centro latérale.

La constitution est identique à celle de l'épithélium sensoriel des macules ; mais ici la membrane extra cellulaire ou cupule est une masse gélatineuse homogène dont une extrémité est fixe au niveau de l'épithélium sensoriel, l'autre est libre et décrit des mouvements angulaires en restant au contact de la paroi opposée de l'ampoule.

RAPPORTS DU LABYRINTHE MEMBRANEUX :

Utricule et saccule sont appliqués sur la face interne du vestibule osseux.

Les canaux membraneux sont disposés excentriquement dans la lumière des canaux osseux dont ils longent la convexité.

Le tissu conjonctif périlabyrinthique amarre le vestibule membraneux à l'endoste et constitue des mésos aux pédicules vasculaires.

La périlymphe occupe les espaces restants entre l'endoste et la paroi conjonctive du labyrinthe.

La vascularisation du labyrinthe membraneux s'effectue à partir de l'artère auditive interne branche de cérebelleuse moyenne, elle donne dans le conduit auditif interne : l'artère vestibulaire pour l'utricule, une grande partie des canaux, une petite partie du saccule, l'artère cochléo-vestibulaire pour une grande partie du saccule, le canal postérieur.

Dans le vestibule les artères gagnent surtout les macules et les crêtes ampullaires. Les veines se drainent vers la veine auditive interne et par son intermédiaire les sinus veineux de la base du crâne, vers la veine de l'aqueduc du vestibule et par son intermédiaire le sinus pétreux supérieur.

COMPOSITION DES LIQUIDES LABYRINTHIQUES :

La périlymphe est pauvre en ion potassium et riche en ion sodium et se rapproche ainsi de la composition du liquide céphalo-rachidien, elle est très riche en protéïnes : 70 à 100 mg contre 10 à 25 mg dans le L.C.R. (Rauch).

L'endolymphe qui est en contact intime avec les cellules sensorielles est particulièrement riche en ion potassium, c'est le liquide de l'économie le plus riche en cet ion. Il est, par contre, pauvre en ion sodium dont le taux demeure remarquablement stable, pauvre en protéïnes.

LES VOIES VESTIBULAIRES

Nous les décrirons de la périphérie vers les centres, suivant ainsi la propagation de l'influx.

L'origine se fait au niveau du pôle basal des cellules ciliées des macules utriculaire et sacculaire et des crêtes ampullaires sous l'aspect d'une sorte de corbeille.

Au niveau des cellules de soutien se trouve une formation pelotonnée.

Ces formations représentent l'origine du prolongement dendritique du neurone dont le corps cellulaire est contenu dans le ganglion de Scarpa.

A partir de ces formations les fibres gagnent la couche épithéliale où elles s'anastomosent entre elles en formant le plexus basal de Ranvier. Puis les fibres traversent la membrane basilaire et comportent dès lors une gaine de myéline, puis elles s'engagent dans la couche dermique du vestibule. La réunion des fibres constitue trois pédicules nerveux individualisés sous les noms de :- nerf utriculaire, le plus volumineux, constitué au niveau de la fossette utriculaire de la réunion des fibres issues de la macula de l'utricule, de la crête acoustique des canaux semi-circulaires antérieur et externe et de la partie antérieure de la macule du saccule.

- nerf sacculaire constitué au niveau de la fossette sacculaire de la réunion des fibres issues de la macule du saccule.
- nerf ampullaire postérieur constitué au niveau de la tache criblée ampullaire postérieure de la réunion des fibres issues de la tache criblée du canal postérieur.

Ces trois nerfs fusionnent au fond du conduit auditif interne au niveau du ganglion de Scarpa, homologue du ganglion spinal des racines rachidiennes postérieures. Ainsi se trouve constitué le nerf vestibulaire.

Celui-ci se fusionne immédiatement avec le nerf cochléaire avec lequel il traverse le conduit auditif interne, le nerf facial étant sus jacent.

Le paquet acoustico-facial ainsi constitué VIII, VII, VIIbis, artère et veine auditive, traverse l'espace ponto-cérebelleux. Le VIII pénètre le tronc cérébral au niveau de la fossette latérale du bulbe à

l'extrémité externe du sillon bulbo-protubérantiel, les fibres vestibulaires étant situées au dessus et en dehors des fibres cochléaires.

A côté des fibres afférentes que nous venons de décrire existent des fibres efférentes qui empruntent le même trajet et se distribuent aux cellules sensorielles à raison d'une fibre efférente pour 60 fibres afférentes.

La terminaison des fibres afférentes s'effectue au niveau de l'aire vestibulaire bulbo protubérantielle dans les noyaux : triangulaire de Schwalbe le plus volumineux et le plus interne, de Deiters le plus externe, de Betcherew susjacent, de Roller sous-jacent, de Lervandowsky ; ainsi que le noyau du toit situé dans le vernis cérebelleux.

On admet que les éléments du labyrinthe possèdent une représentation nucléaire précise : les fibres issues des canaux aboutissent au noyau de Betcherew et au noyau triangulaire, les fibres utriculaires vont à la partie latéro-ventrale du noyau de Deiters, les fibres sacculaires vont à la partie latéro-dorsale du noyau de Roller.

A partir de ces centres, des connexions s'établissent avec : les centres coordinateurs inhibiteurs et facilitateurs de la substance réticulée bulbo-pontique, la corne antérieure de la moëlle et par son intermédiaire toute la musculature striée, les noyaux oculomoteurs, le cervelet, le thalamus et par lui tout le système extra-pyramidal, le système neuro-végétatif, le cortex cérébral.

Ce sont des connexions à double sens. Elles expliquent le rôle joué dans le maintien de l'équilibre et la sensibilité profonde, le rôle joué par les troubles oculaires tel que le nystagmus, le rôle de centre de commande joué par la substance réticulée bulbo-pontique, l'apparition de troubles neuro-végétatifs au cours du déséquilibre, la sensation consciente de désorientation et les phénomènes d'angoisse qui peuvent l'accompagner.

PHYSIOLOGIE DE L'APPAREIL VESTIBULAIRE

En raison des connexions intercentrales des voies vestibulaires qui viennent d'être énoncées, il apparait que les renseignements fournis sur la position ou les mouvements du corps ne sont pas seulement liés aux incitations issues des organes vestibulaires mais aussi d'autres fonctions, en particulier, de la sensibilité profonde et de la vision.

De leur ensemble dépend la fonction de l'équilibre.

Comme le souligne Di Giorgio : l'appareil vestibulaire ne suscite pas comme les extérocepteurs un processus psychique durable différencié et pourvu de ces caractères qui sont propres par exemple à la sensation lumineuse ou à la sensation auditive ; ni le siège anatomique, ni la notion de la stimulation de cet appareil n'émergent à la conscience ; l'identification des caractéristiques du stimulus vestibulaire est impossible contrairement à celle du rayon de lumière ou du son.

Ainsi l'appareil vestibulaire du fait de la complexité de sa structure, du fait de mécanismes perfectionnés qui sont mis en jeu au cours de son excitation et du fait du pouvoir élevé d'analyser les stimuli qui s'y élaborent occupe une position privilégiée parmi les propriocepteurs : c'est le propriocepteur le plus perfectionné et il siège dans la tête dont le rôle est primordial pour l'orientation spatiale et la préparation des mouvements à accomplir.

Notre travail portant sur l'appareil vestibulaire, nous nous attacherons à rappeler les grandes lignes de la physiologie de cet organe : propriocepteur fondamental de la tête et nous ne ferons que citer ensuite sans les développer ses rapports avec la vision et la sensibilité profonde.

LES STIMULI :

Les stimuli habituels sont représentés par :

- la force de gravité : stimulus permanent agissant même au repos.
- l'accélération angulaire
- l'accélération rectiligne
- la force centrifuge.

les résultats sont :

la connaissance de la position de la tête dans l'espace,

le maintien de la position du corps lors du repos et lors du mouvement face aux actions de la force de pesanteur et des accélérations (Réflexes statiques et stato-kinétiques.

la position et les mouvements oculaires face aux actions de ces mêmes forces.

En dehors des stimuli qui ont été décrits, il est possible de créer expérimentalement des stimuli inhabituels.

Le premier, Flourens a pratiqué des destructions des canaux semi-circulaires chez le pigeon et il a pu constater que l'animal présentait de ce fait des mouvements de la tête qui s'effectuent dans le plan du canal sectionné. Il s'agit d'un véritable nystagmus céphalique. De même en

soumettant l'animal ou l'homme à un mouvement de rotation on observe au début et à la fin de la stimulation des mouvements de la tête et des globes oculaires.

Ewald en soumettant les liquides labyrinthiques à des variations de pression fait survenir des phénomènes identiques.

Un autre mode d'excitation, le plus couramment utilisé en clinique, consiste à faire subir aux liquides labyrinthiques des variations de température. De cette manière il devient possible de stimuler isolément l'un des deux labyrinthes.

Quel que soit le stimulus employé, les effets qu'il produit n'apparaissent que chez le sujet normal, la destruction labyrinthique les supprime.

Ces différentes stimulations aboutissent à ce même résultat : un déplacement du liquide endo-labyrinthique.

Cependant, au repos, aucun déplacement de l'endolymphe ne peut avoir lieu et malgré cela les réflexes de posture, de lutte contre les effets de la pesanteur sont assurés.

Ainsi Quix a-t-il énoncé que les canaux semi-circulaires étaient des organes sensoriels cinétiques analysant les divers mouvements tandis que les otolithes étaient des organes statiques renseignant sur la position du corps.

Puis Broca déclara que les canaux semi-circulaires représentent le sens des couples, c'est-à-dire, qu'ils analysent les mouvements complexes tels que les mouvements circulaires, angulaires présentant des changements de direction permanents et que les otolithes analysent un mouvement représenté par une force unidirectionnelle résultante de plusieurs forces rectilignes.

PHENOMENES MECANIQUES DE L'OREILLE INTERNE :

Ceux-ci semblent bien autoriser une telle conception.

- Au niveau des crêtes des ampoules des canaux semi-circulaires :

Le déplacement de l'endolymphe entraine un mouvement strictement proportionnel de la membrane ou cupule. Celle-ci effectue une mobilisation de flexion et de glissement combinés entrainant ainsi les cils des cellules sensorielles. Nous connaissons, en effet, l'intimité du contact entre les cils et la cupule. Ceci explique bien que la stimulation ne s'effectue qu'au début et à la fin du mouvement. Entre ces deux étapes, la vitesse étant uniforme, l'endolymphe demeure immobile. Il faut noter que cette phase intermédiaire n'existe en fait que pour les stimuli physiologiques, le retour de la membrane à sa position initiale s'effectue très lentement sous l'effet de sa force d'élasticité. Cela représente la théorie hydrodynamique qui est unanimement admise.

Quelle que soit la nature du mouvement, les crêtes des trois canaux de chaque vestibule se trouvent ainsi sollicitées. La flexion des cils entraine la production d'actions qui peuvent être excitatrice ou inhibitrice sur les impulsions vestibulaires selon le sens de flexion.

Nous préciserons cette notion au chapitre de la neurophysiologie.

- Au niveau des macules otolithiques : les mécanismes physiologiques n'ont pas été encore totalement élucidés.

Ici la force de gravité entraine la membrane otolithique, en effet, le poids spécifique de cette membrane est bien supérieur à celui de l'endolymphe. L'accélération rectiligne agit de la même façon.

Les données physiologiques actuelles concernant les statolithes recueillies soit par l'étude des courants d'action des fibres nerveuses issues des récepteurs, soit par l'étude des réflexes suscités par les variations de position (et non pas de mouvements) de la tête confirment absolument ces hypothèses.

On admet que la pesanteur ou l'accélération rectiligne peuvent engendrer trois types de mécanisme : pression sur la macule pour une excitation minime, traction de la membrane sur la macule pour une excitation maxima et glissement de la membrane sur la macule.

En ce qui concerne plus particulièrement le saccule, on n'a pas pu démontrer que ce récepteur fût sensible à ces mêmes stimuli. En effet, l'exclusion de cet organe chez l'animal décérébré n'altère pas les réflexes statiques et de redressement déclenchés par les stimuli spécifiques des statolithes. Il semble que l'otolithe sacculaire chez de nombreuses espèces animales et l'homme intervienne beaucoup plus dans la fonction cochléaire que dans celle du vestibule.

En vérité, cette présentation des phénomènes mécaniques au niveau de l'appareil vestibulaire est beaucoup trop schématique.

Il est en effet évident qu'au cours d'une accélération angulaire, le courant endolymphatique engendré existe, non seulement dans les canaux semi-circulaires, mais aussi dans l'utricule et il y aura donc animation des crêtes et des macules. Mais, en outre, au cours des mouvements de la tête l'action de la force de gravité varie du point de vue quantitatif au niveau des récepteurs, en fait, dans tout mouvement s'insère constamment une action gravitationnelle. Ainsi, tout mouvement de la tête entraine, outre l'accélération angulaire propre à celui-ci, une modification de la gravité.

Par ailleurs, sous l'action de la gravité non seulement les macules mais aussi les cupules peuvent modifier leur position. Ledoux a d'ailleurs énoncé que les canaux semi-circulaires antérieur et postérieur, outre qu'ils répondent classiquement à l'accélération angulaire, se comportent comme des statorécepteurs.

Il apparait donc après cette discussion que les différentes forces : gravité, accélération, force centrifuge exercent leur influence aussi bien sur les deux types de récepteurs vestibulaires. Il doit donc se produire dans l'appareil vestibulaire une excitation double et synergique et donc harmonisée des récepteurs statolithiques et ampullaires, l'intégration des informations qui en sont issues sera recueillie par les centres. L'étude des potentiels recueillis sur le nerf vestibulaire va nous confirmer cette conception.

LES COURANTS D'ACTION DU NERF VESTIBULAIRE

- Au repos :

On recueille un courant de repos traduisant vraisemblablement les impulsions gravitationnelles agissant en permanence.

- Lors des mouvements de la tête, deux possibilités : augmentation ou diminution des courants de repos. Et ce, en fonction du sens du mouvement, c'est à dire selon le sens de déplacement des cils. Mais à une augmentation des courants sur le nerf vestibulaire d'un côté correspond toujours une inhibition sur le nerf vestibulaire controlatéral et inversement le rythme des potentiels d'action croit ou décroit linéairement avec le logarithme du stimulus.

D'où la loi d'Ewald :

Il y a augmentation des courants de repos lorsqu'est réalisé à l'intérieur d'un canal horizontal un courant endolymphatique ampullopète ; il y a diminution des courants de repos lorsqu'est réalisé à l'intérieur d'un canal horizontal un courant ampullofuge. Dans les canaux verticaux c'est l'inverse, c'est à dire que le courant ampullofuge entraine une augmentation des courants de repos et inversement.

Cela revient à dire qu'il y a dépolarisation d'une cellule ciliée de la crête pour un mouvement ampullopète et hyperpolarisation dans le cas inverse (Katsaki).

Physiologiquement, les trois canaux droits et gauches sont ainsi mis en jeu et c'est la somme algébrique des impulsions qui en sont issues qui sera recueillie sur le nerf vestibulaire. L'intégration des informations issues des deux côtés est effectuée par les centres.

Il faut noter que le stimulus ampullaire n'intervient qu'à partir d'un certain seuil, tandis que le stimulus des macules représenté par la pesanteur est permanent et qu'on n'y observe, en outre, aucune adaptation.

- Le rôle des fibres nerveuses efférentes a pu être étudié en recueillant les potentiels sur leur trajet: ceux-ci présentent toujours une amplitude qui est proportionnelle à celle qui peut être enregistrée sur les fibres afférentes. Il semble ainsi que ce système efférent exerce, en permanence, un contrôle en retour sur le système afférent dont il module ainsi l'activité.

LES REFLEXES VESTIBULAIRES -

Ceux-ci vont s'exercer sur la musculature striée de la tête, du cou, du tronc et des membres. On distingue :

- Les réflexes de posture ou antigravitaires
- Les réflexes de redressement
- Les réflexes de préparation tonique à l'activité pyramidale.

Ces réflexes s'expliquent du fait des connexions intercentrales des noyaux vestibulaires qui ont été citées. Parmi ces connexions, celles qui s'établissent avec le système neuro végétatif méritent une attention particulière.

W.H. Johnsona fait la synthèse des principales observations qui permettent d'attribuer à l'appareil vestibulaire les troubles de la lignée neuro végétative ou mal des transports. Des animaux (chiens et chats) privés d'appareil vestibulaire ou chez qui la VIII paire a été sectionnée ne présentent plus ces troubles liés au mouvement. La destruction chez le chien dans le cervelet des voies vestibulaires supprime ces mêmes troubles. Les sourd-muets, qui présentent une absence congénitale d'oreille interne n'en présentent pas davantage, de même les sujets dont l'appareil vestibulaire a été accidentellement détruit. Par ailleurs, il est bien connu qu'une stimulation calorique une peu forte fait apparaitre chez le sujet normal, outre un nystagmus important, des signes neuro-végétatifs à type de nausées, vomissements, pâleur, respiration courte et superficielle ..... Selon l'auteur, il semble que les accélérations angulaires qui stimulent surtout les canaux semi-circulaires soient responsables, tandis que les accélérations linéaires qui agissent beaucoup plus sur les otolithes ne soient pas en cause. Toujours est-il que ces manifestations peuvent être considérées comme de véritables réflexes spécifiques de l'appareil vestibulaire.

LE NYSTAGMUS :

Réflexe moteur de caractère tonico-clonique, involontaire, rythmique, né des contractions coordonnées des muscles orbitaires à action antagoniste.

La composante lente, équivalente aux déviations segmentaires résulte comme tous les autres réflexes vestibulaires d'une excitation des récepteurs vestibulaires. Cette excitation met ensuite en jeu les aires nystagmogènes de la substance réticulée. A partir de ces centres les impulsions gagnent les neurones moteurs oculaires réglés par l'innervation réciproque de Sherrington.

La composante rapide résulte uniquement de l'action correctrice imprinée par le système nerveux central (substance réticulo-bulbo pontique)

Pour qu'apparaisse le Nystagmus, les potentiels d'action du nerf vestibulaire doivent être augmentés d'au moins 50%

Le Nystagmus répond à toute stimulation physiologique ou pathologique de quelque importance des canaux semi-circulaires ou des voies nerveuses qui en sont issues. L'ensemble du système constitue l'arc réflexe vestibulo-oculaire. Bien que la structure anatomique n'en soit pas encore entièrement élucidée car il s'agit souvent de liaisons polysynaptiques, les relations fonctionnelles sont aujourd'hui assez bien connues, grâce à l'expérimentation stéréotaxique, entre les trois éléments constitutifs : noyaux oculo-moteurs, voies optiques et voies nerveuses issues des noyaux vestibulaires bulbaires.

Quelle est la participation de l'utricule dans la formation du Nystagmus ?

Dès 1921, Barany décrivait le Nystagmus de position qu'il pensait pouvoir attribuer à la seule influence des otolithes. Dix et Hallpike en 1952 notèrent des modifications sensibles à l'examen post-mortem de la macule utriculaire d'un sujet porteur d'un nystagmus de position. Puis on démontra que les impulsions nystagmiques transmises par le nerf utriculaire

étaient modifiées la tête se trouvant en position légèrement relevée ou en position tête basse.

Il est donc permis de penser que l'utricule joue un rôle important sur le nystagmus. Maxwell en 1923 pensait que l'appareil otolithique et les canaux semi-circulaires exerçaient une action synergique. Mc Nally en 1955 parle de coopération entre les deux appareils. Hallpike en 1942 suggérait qu'au cours de la stimulation calorique c'est l'élimination de l'impulsion tonique de l'utricule d'un côté qui permet l'apparition de la composante dominante. Ovada en 1960 reprenant ces études sur le lapin montre que le Nystagmus obtenu après section du nerf du canal horizontal se trouve modifié par les variations de position de la tête de l'animal.

Si, dans un second temps, le nerf utriculaire est à son tour sectionné la composante dominante du Nystagmus est renversée et le Nystagmus n'est plus modifié par les changements de position de la tête. Il en conclut que la fonction de l'utricule participe à l'élaboration du Nystagmus. Jansekee et Jongkees enregistrent par électro-nystagmographie le nystagmus provoqué par une rotation constante autour d'un axe horizontal céphalo-caudal combinée à une accélération sinusoïdale autour d'un axe vertical, une analyse mathématique du vecteur spatial est présentée. Les courbes sont analysées. Elles montrent des éléments otolithiques et canaliculaires, un seul vecteur exerce une stimulation différente sur le labyrinthe de droite et de gauche, mais aussi sur la partie otolithique et canaliculaire d'un seul labyrinthe. Correia et Guedry par des méthodes voisines ont montré que la réorientation continuelle des macules par rapport à la gravité est susceptible, à elle seule, de se traduire par un nystagmus ou tout au moins de le maintenir après qu'il ait été induit par la stimulation des canaux semi-circulaires. Graybiel et ses collaborateurs au terme de leurs dernières études à ce sujet aboutissent à cette même conclusion : le Nystagmus provoqué par l'excitation des canaux se trouverait modulé par l'excitation des otolithes.

Nous pouvons donc considérer que l'observation du Nystagmus et de ses variations dans l'étude de la physio-pathologie des organes otolithiques est une méthode valable pour le sujet que nous nous sommes proposés d'étudier.

EFFET CORIOLIS :

Bien que débordant légèrement le cadre de la physiologie pure, il nous parait bon de décrire sommairement ce phénomène que nous retrouverons bien souvent cité dans ce travail.

Ce terme d'effet Coriolis fut introduit par Schubert. Il a été remarqué, en effet, qu'au cours d'une rotation à vitesse constante subie par un organisme il n'existe aucune stimulation cupulaire au niveau du canal situé dans le plan de rotation. Mais lors d'un changement de position de ce canal par rapport au plan de rotation, c'est-à-dire d'un mouvement de la tête apparaissent des phénomènes d'accélération complexe dits de Coriolis inférieurs à 0,000001 G (Margaria) mais cependant parfois suffisants pour entrainer une déviation cupulaire et un vertige avec Nystagmus (Schubert, Arslan et Megighion). Après disparition du Nystagmus perrotatoire lors d'une rotation à vitesse constante, la flexion de la tête en avant entraine l'apparition d'un Nystagmus en sens inverse ; puis après épuisement de ce second Nystagmus, une flexion de la tête vers l'arrière

fait apparaitre un nouveau nystagmus de même sens que le nystagmus perrotatoire initial. Or, celui-ci lié aux variations de positions de la tête est accompagné de phénomènes neurovégétatifs importants (Arslan).

Johnson démontra en réalisant un labyrinthe artificiel l'existence de forts courants de convection dans les canaux exposés à une accélération de Coriolis. Puis, cet auteur avec Méda et Montague ont montré que l'amplitude des manifestations objectives et subjectives observées résultent de l'accélération de Coriolis y compris la vitesse de la composante lente du nystagmus qui est fonction de la vitesse angulaire de rotation, de la vitesse et du degré de changement de position du canal. Par ailleurs, ils purent conclure à l'appui d'études expérimentales que le système otolithique était également concerné par l'accélération de Coriolis.

Di Giorgo pense que l'action inhibitrice normalement exercée par les otolithes sur les réflexes ampullaires se trouve modifiée par l'accélération de Coriolis. Benson et Bodin considèrent que l'accélération linéaire modifie les caractéristiques dynamiques du système canal-endolymphe-cupule et que la déformation élastique de la cupule est moindre quand ce vecteur d'accélération est dans le même plan que le canal. Pour Guedry la modification des réponses post rotatoires peut s'expliquer par une aptitude des signaux à point de départ otolithique en conflit avec les signaux "inappropriés" venant des canaux, à modifier l'arc réflexe vestibulo oculaire de façon propre à hâter la disparition des signaux afférents d'origine ampullaire.

L'HABITUATION VESTIBULAIRE -

Phénomène bien connu depuis Dunlap en 1925. Nous relaterons ici les conclusions des études récentes de Maspetiol à son sujet.

La répétition d'un même stimulus qu'il soit calorique ou rotatoire entraine une diminution de la réponse vestibulaire. Cette habituation relève de processus centraux au contraire des phénomènes d'adaptation et de fatigue qui eux sont d'origine périphérique et apparaissent à la suite de stimuli non pas répétés, mais continus et prolongés.

Le phénomène d'habituation comporte plusieurs composantes :

- Un processus d'acquisition qui se traduit par la diminution progressive des différentes composantes du nystagmus et particulièrement sur la fréquence et l'amplitude de celui-ci.

- Un processus de rétention inconstant : l'habituation persiste pendant quelques jours.

- Un processus de transfert : nystagmus habitué à battre dans une certaine direction s'y maintient malgré l'excitation de l'oreille opposée. Ainsi donc l'habituation possède une action sur l'oreille opposée.

Du point de vue neuro-physiologique, l'habituation traduit une inhibition d'origine centrale : essentiellement au niveau de la formation réticulée, du cervelet, du noyau du toit et l'olive, le cortex intervient peu ici, il intervient par contre à l'égard des sensations subjectives du malaise végétatif.

Ce contrôle central des réactions vestibulaires est déjà manifeste dans l'épreuve de la cupulométrie. On sait, en effet, qu'il existe un décalage de la courbe de sensation par rapport à celle du nystagmus. Chez des sujets normaux, il est des cas, rares d'ailleurs où l'habituation est faible ou nulle.

L'examen des patineurs artistiques qui se trouvent soumis à des accélérations importantes et répétées présente aussi dans ce domaine un grand intérêt. Bien des auteurs relatent que chez ces sujets l'excitabilité du vestibule devient très faible, voire nulle. Cependant, Collins a pu montré qu'en l'absence de tout repère visuel, les réponses vestibulaires et nystagmiques chez ces sujets deviennent très intenses. Cela semble démontrer que la fixation du regard soit une condition nécessaire à l'habituation vestibulaire.

Nous devons cependant bien distinguer entre l'habituation involontaire et l'habituation volontaire obtenue par l'instruction de l'homme avant de le soumettre à des excitations inhabituelles. Benson, à la suite d'études sur les effets de l'instruction sur les sensations et le nystagmus post rotatoire conclut que l'instruction exerce son influence en créant des coupures entre l'organe périphérique et les centres.

Ces notions sont d'une grande importance, nous le verrons pour la détermination de méthodes prophyllactiques face aux troubles éventuels de la fonction de l'appareil vestibulaire en présence d'une ambiance inhabituelle.

Rôle des sensibilités proprioceptive et extéroceptive et de la vision dans l'équilibre -

Par sensibilité proprioceptive, il faut entendre tout le système de la musculature striée et tout le système ostéo-articulaire. Son rôle est primordial dans l'information sur la position de la tête et du corps. On peut dire que l'équilibre corporel est maintenu grâce aux impulsions efférentes des propriocepteurs survenant de façon réflexe, inconsciente à l'occasion des différents mouvements. L'aboutissement en est le réflexe myostatique qui modifie l'état musculaire, les différents déplacements segmentaires.

La collaboration entre l'appareil vestibulaire et la sensibilité profonde est très étroite. C'est ainsi que la destruction labyrinthique unilatérale chez l'animal réalise une déviation des yeux, de la tête et de l'ensemble du corps du côté détruit, l'animal est incapable, non seulement de s'opposer à de telles déviations, mais aussi d'adopter une nouvelle attitude. Il donne l'impression de présenter des troubles moteurs paralytiques. La destruction labyrinthique bilatérale entraine une hypotonie musculaire généralisée. Des physiologistes ont placé dans un ascenseur se déplaçant de telle sorte qu'aucun contrôle visuel soit possible des sourd-muets dont le labyrinthe est fonctionnellement inexistant, des tabétiques privés de sensibilité profonde et des sujets normaux. Ces derniers seuls éprouvent des sensations précises, les sourd-muets n'en présentent aucune, les tabétiques sont incapables de les apprécier. Il semble donc que la sensibilité profonde puisse donner une information dans le mouvement rectiligne.

Nous préciserons cette notion au chapitre de la neurophysiologie.

- Au niveau des macules otolithiques : les mécanismes physiologiques n'ont pas été encore totalement élucidés.

Ici la force de gravité entraine la membrane otolithique, en effet, le poids spécifique de cette membrane est bien supérieur à celui de l'endolymphe. L'accélération rectiligne agit de la même façon.

Les données physiologiques actuelles concernant les statolithes recueillies soit par l'étude des courants d'action des fibres nerveuses issues des récepteurs, soit par l'étude des réflexes suscités par les variations de position (et non pas de mouvements) de la tête confirment absolument ces hypothèses.

On admet que la pesanteur ou l'accélération rectiligne peuvent engendrer trois types de mécanisme : pression sur la macule pour une excitation minime, traction de la membrane sur la macule pour une excitation maxima et glissement de la membrane sur la macule.

En ce qui concerne plus particulièrement le saccule, on n'a pas pu démontrer que ce récepteur fût sensible à ces mêmes stimuli. En effet, l'exclusion de cet organe chez l'animal décérébré n'altère pas les réflexes statiques et de redressement déclenchés par les stimuli spécifiques des statolithes. Il semble que l'otolithe sacculaire chez de nombreuses espèces animales et l'homme intervienne beaucoup plus dans la fonction cochléaire que dans celle du vestibule.

En vérité, cette présentation des phénomènes mécaniques au niveau de l'appareil vestibulaire est beaucoup trop schématique.

Il est en effet évident qu'au cours d'une accélération angulaire, le courant endolymphatique engendré existe, non seulement dans les canaux semi-circulaires, mais aussi dans l'utricule et il y aura donc animation des crêtes et des macules. Mais, en outre, au cours des mouvements de la tête l'action de la force de gravité varie du point de vue quantitatif au niveau des récepteurs, en fait, dans tout mouvement s'insère constamment une action gravitationnelle. Ainsi, tout mouvement de la tête entraine, outre l'accélération angulaire propre à celui-ci, une modification de la gravité.

Par ailleurs, sous l'action de la gravité non seulement les macules mais aussi les cupules peuvent modifier leur position. Ledoux a d'ailleurs énoncé que les canaux semi-circulaires antérieur et postérieur, outre qu'ils répondent classiquement à l'accélération angulaire, se comportent comme des statorécepteurs.

Il apparait donc après cette discussion que les différentes forces : gravité, accélération, force centrifuge exercent leur influence aussi bien sur les deux types de récepteurs vestibulaires. Il doit donc se produire dans l'appareil vestibulaire une excitation double et synergique et donc harmonisée des récepteurs statolithiques et ampullaires, l'intégration des informations qui en sont issues sera recueillie par les centres. L'étude des potentiels recueillis sur le nerf vestibulaire va nous confirmer cette conception.

LES COURANTS D'ACTION DU NERF VESTIBULAIRE

- Au repos :

On recueille un courant de repos traduisant vraisemblablement les impulsions gravitationnelles agissant en permanence.

- Lors des mouvements de la tête, deux possibilités : augmentation ou diminution des courants de repos. Et ce, en fonction du sens du mouvement, c'est à dire selon le sens de déplacement des cils. Mais à une augmentation des courants sur le nerf vestibulaire d'un côté correspond toujours une inhibition sur le nerf vestibulaire controlatéral et inversement le rythme des potentiels d'action croit ou décroit linéairement avec le logarithme du stimulus.

D'où la loi d'Ewald :

Il y a augmentation des courants de repos lorsqu'est réalisé à l'intérieur d'un canal horizontal un courant endolymphatique ampullopète ; il y a diminution des courants de repos lorsqu'est réalisé à l'intérieur d'un canal horizontal un courant ampullofuge. Dans les canaux verticaux c'est l'inverse, c'est à dire que le courant ampullofuge entraine une augmentation des courants de repos et inversement.

Cela revient à dire qu'il y a dépolarisation d'une cellule ciliée de la crête pour un mouvement ampullopète et hyperpolarisation dans le cas inverse (Katsaki).

Physiologiquement, les trois canaux droits et gauches sont ainsi mis en jeu et c'est la somme algébrique des impulsions qui en sont issues qui sera recueillie sur le nerf vestibulaire. L'intégration des informations issues des deux côtés est effectuée par les centres.

Il faut noter que le stimulus ampullaire n'intervient qu'à partir d'un certain seuil, tandis que le stimulus des macules représenté par la pesanteur est permanent et qu'on n'y observe, en outre, aucune adaptation.

- Le rôle des fibres nerveuses efférentes a pu être étudié en recueillant les potentiels sur leur trajet: ceux-ci présentent toujours une amplitude qui est proportionnelle à celle qui peut être enregistrée sur les fibres afférentes. Il semble ainsi que ce système efférent exerce, en permanence, un contrôle en retour sur le système afférent dont il module ainsi l'activité.

LES REFLEXES VESTIBULAIRES -

Ceux-ci vont s'exercer sur la musculature striée de la tête, du cou, du tronc et des membres. On distingue :

- Les réflexes de posture ou antigravitaires
- Les réflexes de redressement
- Les réflexes de préparation tonique à l'activité pyramidale.

Ces réflexes s'expliquent du fait des connexions intercentrales des noyaux vestibulaires qui ont été citées. Parmi ces connexions, celles qui s'établissent avec le système neuro végétatif méritent une attention particulière.

W.H. Johnsona fait la synthèse des principales observations qui permettent d'attribuer à l'appareil vestibulaire les troubles de la lignée neuro végétative ou mal des transports. Des animaux (chiens et chats) privés d'appareil vestibulaire ou chez qui la VIII paire a été sectionnée ne présentent plus ces troubles liés au mouvement. La destruction chez le chien dans le cervelet des voies vestibulaires supprime ces mêmes troubles. Les sourd-muets, qui présentent une absence congénitale d'oreille interne n'en présentent pas davantage, de même les sujets dont l'appareil vestibulaire a été accidentellement détruit. Par ailleurs, il est bien connu qu'une stimulation calorique une peu forte fait apparaitre chez le sujet normal, outre un nystagmus important, des signes neuro-végétatifs à type de nausées, vomissements, pâleur, respiration courte et superficielle ..... Selon l'auteur, il semble que les accélérations angulaires qui stimulent surtout les canaux semi-circulaires soient responsables, tandis que les accélérations linéaires qui agissent beaucoup plus sur les otolithes ne soient pas en cause. Toujours est-il que ces manifestations peuvent être considérées comme de véritables réflexes spécifiques de l'appareil vestibulaire.

LE NYSTAGMUS :

Réflexe moteur de caractère tonico-clonique, involontaire, rythmique, né des contractions coordonnées des muscles orbitaires à action antagoniste.

La composante lente, équivalente aux déviations segmentaires résulte comme tous les autres réflexes vestibulaires d'une excitation des récepteurs vestibulaires. Cette excitation met ensuite en jeu les aires nystagmogènes de la substance réticulée. A partir de ces centres les impulsions gagnent les neurones moteurs oculaires réglés par l'innervation réciproque de Sherrington.

La composante rapide résulte uniquement de l'action correctrice imprimée par le système nerveux central (substance réticulo-bulbo pontique)

Pour qu'apparaisse le Nystagmus, les potentiels d'action du nerf vestibulaire doivent être augmentés d'au moins 50%

Le Nystagmus répond à toute stimulation physiologique ou pathologique de quelque importance des canaux semi-circulaires ou des voies nerveuses qui en sont issues. L'ensemble du système constitue l'arc réflexe vestibulo-oculaire. Bien que la structure anatomique n'en soit pas encore entièrement élucidée car il s'agit souvent de liaisons polysynaptiques, les relations fonctionnelles sont aujourd'hui assez bien connues, grâce à l'expérimentation stéréotaxique, entre les trois éléments constitutifs : noyaux oculo-moteurs, voies optiques et voies nerveuses issues des noyaux vestibulaires bulbaires.

Quelle est la participation de l'utricule dans la formation du Nystagmus ?

Dès 1921, Barany décrivait le Nystagmus de position qu'il pensait pouvoir attribuer à la seule influence des otolithes. Dix et Hallpike en 1952 notèrent des modifications sensibles à l'examen post-mortem de la macule utriculaire d'un sujet porteur d'un nystagmus de position. Puis on démontra que les impulsions nystagmiques transmises par le nerf utriculaire

étaient modifiées la tête se trouvant en position légèrement relevée ou en position tête basse.

Il est donc permis de penser que l'utricule joue un rôle important sur le nystagmus. Maxwell en 1923 pensait que l'appareil otolithique et les canaux semi-circulaires exerçaient une action synergique. Mc Nally en 1955 parle de coopération entre les deux appareils. Hallpike en 1942 suggérait qu'au cours de la stimulation calorique c'est l'élimination de l'impulsion tonique de l'utricule d'un côté qui permet l'apparition de la composante dominante. Ovada en 1960 reprenant ces études sur le lapin montre que le Nystagmus obtenu après section du nerf du canal horizontal se trouve modifié par les variations de position de la tête de l'animal.

Si, dans un second temps, le nerf utriculaire est à son tour sectionné la composante dominante du Nystagmus est renversée et le Nystagmus n'est plus modifié par les changements de position de la tête. Il en conclut que la fonction de l'utricule participe à l'élaboration du Nystagmus. Jongkee et Jongkees enregistrent par électro-nystagmographie le nystagmus provoqué par une rotation constante autour d'un axe horizontal céphalo-caudal combinée à une accélération sinusoïdale autour d'un axe vertical, une analyse mathématique du vecteur spatial est présentée. Les courbes sont analysées. Elles montrent des éléments otolithiques et canaliculaires, un seul vecteur exerce une stimulation différente sur le labyrinthe de droite et de gauche, mais aussi sur la partie otolithique et canaliculaire d'un seul labyrinthe. Correia et Guedry par des méthodes voisines ont montré que la réorientation continuelle des macules par rapport à la gravité est susceptible, à elle seule, de se traduire par un nystagmus ou tout au moins de le maintenir après qu'il ait été induit par la stimulation des canaux semi-circulaires. Graybiel et ses collaborateurs au terme de leurs dernières études à ce sujet aboutissent à cette même conclusion : le Nystagmus provoqué par l'excitation des canaux se trouverait modulé par l'excitation des otolithes.

Nous pouvons donc considérer que l'observation du Nystagmus et de ses variations dans l'étude de la physio-pathologie des organes otolithiques est une méthode valable pour le sujet que nous nous sommes proposés d'étudier.

EFFET CORIOLIS :

Bien que débordant légèrement le cadre de la physiologie pure, il nous paraît bon de décrire sommairement ce phénomène que nous retrouverons bien souvent cité dans ce travail.

Ce terme d'effet Coriolis fut introduit par Schubert. Il a été remarqué, en effet, qu'au cours d'une rotation à vitesse constante subie par un organisme il n'existe aucune stimulation cupulaire au niveau du canal situé dans le plan de rotation. Mais lors d'un changement de position de ce canal par rapport au plan de rotation, c'est-à-dire d'un mouvement de la tête apparaissent des phénomènes d'accélération complexe dits de Coriolis inférieurs à 0,000001 G (Margaria) mais cependant parfois suffisants pour entrainer une déviation cupulaire et un vertige avec Nystagmus (Schubert, Arslan et Megighion). Après disparition du Nystagmus perrotatoire lors d'une rotation à vitesse constante, la flexion de la tête en avant entraine l'apparition d'un Nystagmus en sens inverse ; puis après épuisement de ce second Nystagmus, une flexion de la tête vers l'arrière

fait apparaitre un nouveau nystagmus de même sens que le nystagmus perrotatoire initial. Or, celui-ci lié aux variations de positions de la tête est accompagné de phénomènes neurovégétatifs importants (Arslan).

Johnson démontra en réalisant un labyrinthe artificiel l'existence de forts courants de convection dans les canaux exposés à une accélération de Coriolis. Puis, cet auteur avec Méda et Montague ont montré que l'amplitude des manifestations objectives et subjectives observées résultent de l'accélération de Coriolis y compris la vitesse de la composante lente du nystagmus qui est fonction de la vitesse angulaire de rotation, de la vitesse et du degré de changement de position du canal. Par ailleurs, ils purent conclure à l'appui d'études expérimentales que le système otolithique était également concerné par l'accélération de Coriolis.

Di Giorgo pense que l'action inhibitrice normalement exercée par les otolithes sur les réflexes ampullaires se trouve modifiée par l'accélération de Coriolis. Benson et Bodin considèrent que l'accélération linéaire modifie les caractéristiques dynamiques du système canal-endolymphe-cupule et que la déformation élastique de la cupule est moindre quand ce vecteur d'accélération est dans le même plan que le canal. Pour Guedry la modification des réponses post rotatoires peut s'expliquer par une aptitude des signaux à point de départ otolithique en conflit avec les signaux "inappropriés" venant des canaux, à modifier l'arc réflexe vestibulo oculaire de façon propre à hâter la disparition des signaux afférents d'origine ampullaire.

L'HABITUATION VESTIBULAIRE -

Phénomène bien connu depuis Dunlap en 1925. Nous relaterons ici les conclusions des études récentes de Maspetiol à son sujet.

La répétition d'un même stimulus qu'il soit calorique ou rotatoire entraine une diminution de la réponse vestibulaire. Cette habituation relève de processus centraux au contraire des phénomènes d'adaptation et de fatigue qui eux sont d'origine périphérique et apparaissent à la suite de stimuli non pas répétés, mais continus et prolongés.

Le phénomène d'habituation comporte plusieurs composantes :

- Un processus d'acquisition qui se traduit par la diminution progressive des différentes composantes du nystagmus et particulièrement sur la fréquence et l'amplitude de celui-ci.

- Un processus de rétention inconstant : l'habituation persiste pendant quelques jours.

- Un processus de transfert : nystagmus habitué à battre dans une certaine direction s'y maintient malgré l'excitation de l'oreille opposée. Ainsi donc l'habituation possède une action sur l'oreille opposée.

Du point de vue neuro-physiologique, l'habituation traduit une inhibition d'origine centrale : essentiellement au niveau de la formation réticulée, du cervelet, du noyau du toit et l'olive, le cortex intervient peu ici, il intervient par contre à l'égard des sensations subjectives du malaise végétatif.

Ce contrôle central des réactions vestibulaires est déjà manifeste dans l'épreuve de la cupulométrie. On sait, en effet, qu'il existe un décalage de la courbe de sensation par rapport à celle du nystagmus. Chez des sujets normaux, il est des cas, rares d'ailleurs où l'habituation est faible ou nulle.

L'examen des patineurs artistiques qui se trouvent soumis à des accélérations importantes et répétées présente aussi dans ce domaine un grand intérêt. Bien des auteurs relatent que chez ces sujets l'excitabilité du vestibule devient très faible, voire nulle. Cependant, Collins a pu montré qu'en l'absence de tout repère visuel, les réponses vestibulaires et nystagmiques chez ces sujets deviennent très intenses. Cela semble démontrer que la fixation du regard soit une condition nécessaire à l'habituation vestibulaire.

Nous devons cependant bien distinguer entre l'habituation involontaire et l'habituation volontaire obtenue par l'instruction de l'homme avant de le soumettre à des excitations inhabituelles. Benson, à la suite d'études sur les effets de l'instruction sur les sensations et le nystagmus post rotatoire conclut que l'instruction exerce son influence en créant des coupures entre l'organe périphérique et les centres.

Ces notions sont d'une grande importance, nous le verrons pour la détermination de méthodes prophyllactiques face aux troubles éventuels de la fonction de l'appareil vestibulaire en présence d'une ambiance inhabituelle.

Rôle des sensibilités proprioceptive et extéroceptive et de la vision dans l'équilibre -

Par sensibilité proprioceptive, il faut entendre tout le système de la musculature striée et tout le système ostéo-articulaire. Son rôle est primordial dans l'information sur la position de la tête et du corps. On peut dire que l'équilibre corporel est maintenu grâce aux impulsions efférentes des propriocepteurs survenant de façon réflexe, inconsciente à l'occasion des différents mouvements. L'aboutissement en est le réflexe myostatique qui modifie l'état musculaire, les différents déplacements segmentaires.

La collaboration entre l'appareil vestibulaire et la sensibilité profonde est très étroite. C'est ainsi que la destruction labyrinthique unilatérale chez l'animal réalise une déviation des yeux, de la tête et de l'ensemble du corps du côté détruit, l'animal est incapable, non seulement de s'opposer à de telles déviations, mais aussi d'adopter une nouvelle attitude. Il donne l'impression de présenter des troubles moteurs paralytiques. La destruction labyrinthique bilatérale entraine une hypotonie musculaire généralisée. Des physiologistes ont placé dans un ascenseur se déplaçant de telle sorte qu'aucun contrôle visuel soit possible des sourd-muets dont le labyrinthe est fonctionnellement inexistant, des tabétiques privés de sensibilité profonde et des sujets normaux. Ces derniers seuls éprouvent des sensations précises, les sourd-muets n'en présentent aucune, les tabétiques sont incapables de les apprécier. Il semble donc que la sensibilité profonde puisse donner une information dans le mouvement rectiligne.

Le rôle de la sensibilité extéroceptive est évident, un contact, une pression au niveau de la peau peuvent suffire à déclencher des réflexes de posture.

La vision, quant à elle, renseigne l'homme en permanence sur la situation de son corps par rapport à l'environnement. Il n'est qu'à constater les difficultés éprouvées pour s'orienter et se déplacer dans l'obscurité chez le sujet normal. Chez le tabétique la vision supplée la perte des réflexes de posture d'origine proprioceptive. L'animal privé de labyrinthe arrive à se réadapter au bout d'un certain temps mais cette possibilité disparait en l'absence de tout repère visuel.

Ainsi, l'équilibre se trouve assuré grâce aux actions de plusieurs appareils dont l'appareil vestibulaire. La coordination est essentiellement réglée par les centres réticulaires bulbo pontique, thalamique, le cervelet et le système extra-pyramidal. Il est généralement admis que deux des fonctions qui contrôlent l'équilibre doivent être correctement assurées, faute de quoi survient une désorientation.

En ce qui concerne la fonction vestibulaire : celle-ci sous son double aspect de sensibilité consciente et de sensibilité réflexogène mettant en jeu des circuits d'intégration dont les effecteurs sont les motoneurones oculomoteurs et médullaires, repose sur l'excitation par déformation traction ou pesée de structures ciliaires soit au niveau des récepteurs ampullaires, point de départ de réflexes dynamiques, soit au niveau des récepteurs otolithiques point de départ de réflexes toniques. Cette dualité anatomique et fonctionnelle du système vestibulaire explique l'apparition de phénomènes perceptifs d'une part, neuro végétatifs, d'autre part, lors des accélérations linéaires ou angulaires et des variations de pesanteur qui se trouvent réalisées dans les conditions du vol aérien et du vol spatial.

L'EXAMEN DE L'APPAREIL VESTIBULAIRE

Cet examen comporte la recherche des signes spontanés et des signes révélés au cours des épreuves vestibulaires.

LES SIGNES SPONTANES

Il en est de subjectifs et d'objectifs.

La sensation vertigineuse

Elle représente la manifestation subjective fondamentale.

Elle est définie par Hautant comme étant un "Phénomène cérébral caractérisé par une sensation de déséquilibre le plus souvent fausse ne correspondant à aucun déplacement réel du corps".

Cette sensation, véritable hallucination du mouvement, peut être divisée selon 3 composantes.:

- Une sensation de déplacement, perception illusoire de mouvement des objets par rapport au corps, plus rarement du corps par rapport aux objets. Si, habituellement, ce déplacement se fait sous un mode rotatoire, il peut quelquefois se faire sous un mode vertical ou latéral. Si le vertige est atténué, il peut s'agir simplement de sensation de latéro pulsion, d'oscillations du corps ou des objets environnants, de simples sensations d'instabilité.

- Une sensation de malaise analogue au mal de mer et s'accompagnant comme lui de nausées et parfois de vomissements.

- Une sensation angoissante de chute enfin.

Une grande crise de vertige peut entrainer la chute ; le sujet doit conserver un repos absolu, il redoute le bruit, la lumière et surtout le moindre mouvement de la tête et des yeux, la durée du vertige est très variable. Il n'y a jamais perte de connaissance.

LES SIGNES OBJECTIFS SPONTANES

Le nystagmus spontané

Il sera recherché à l'aide des lunettes de Bartels portant des verres de 20 dioptries ce qui évite toute possibilité de fixation du regard et permet une meilleure analyse du nystagmus.

Nous ne ferons que rappeler les principaux caractères du nystagmus :

- sa forme : horizontal-rotatoire ou pur : horizontal, vertical ou rotatoire.

- sa direction : horizontal droit ou gauche
  vertical supérieur ou inférieur
  horaire ou anti horaire.

La direction peut être simple battant d'un seul côté ou bilatérale ou encore multiple.

- son intensité : degré I lorsqu'il apparait pour une direction du regard faisant un angle d'environ 45° avec le regard direct

degré II lorsqu'il apparait dans le regard direct.

degré III lorsqu'il persiste dans le regard latéral, du côté opposé à la secousse rapide.

L'électro-nystagmographie permet une étude beaucoup plus fine des composantes du nystagmus, notamment en ce qui concerne la durée, la fréquence, l'amplitude, le seuil d'apparition, voire la vitesse du déplacement oculaire.

La déviation segmentaire :

- Au niveau du membre supérieur, les yeux étant fermés par

l'épreuve des bras tendus

ou l'épreuve d'indication de Quix, cette dernière permettant l'examen séparé de chaque canal seni-circulaire.

- Au niveau du membre inférieur, moins facile à rechercher et aussi moins sensible que la précédente, elle consiste en l'épreuve de Barré et Mingazzini.

Les troubles de l'équilibre :

- L'épreuve de Romberg effectuée yeux fermés : l'inclinaison latérale ou la déviation antéro supérieure apparait après un certain temps de latence, se constitue peu à peu, c'est une déviation du tronc, une sorte de latéro pulsion sur place qui se corrige dès que le sujet ouvre les yeux.

- L'épreuve de la marche aveugle de Babinski et Weill, à la recherche d'une déviation avec démarche en étoile.

- L'épreuve d'adaptation de Radenaker et Garcin, à la recherche d'une modification des réflexes de redressement.

- Phénomène de la poussée de Foix et Thévenard, à la recherche des modifications du tonus.

Les Signes spontanés en faveur d'une atteinte de l'appareil vestibulaire périphérique :

Le vertige est généralement intense et apparait volontiers pour une position donnée. Il n'y a pas de temps de latence. Il s'estompe assez vite et tend à réapparaitre avec la reprise de la position.

Le nystagmus est presque toujours de type horizontal-rotatoire, très rarement horizontal ou rotatoire pur.

Le Romberg est harmonieux suivant la secousse lente du nystagmus, il varie avec la position de la tête. Il en est de même de la démarche en étoile.

Les épreuves d'adaptation sont perturbées dans les lésions périphériques bilatérales, en cas d'atteinte unilatérale les épreuves peuvent être troublées de façon transitoire avant la période de compensation. Il en est de même du phénomène de la poussée.

LES SIGNES PROVOQUES :

Les modalités des épreuves classiques sont trop connues pour qu'il soit nécessaire de les décrire en détail ici.

L'épreuve calorique :

La plus couramment utilisée s'effectue selon la méthode de Hautant : injection de 10 cm3 d'eau à 25° qui représente l'injection unité pour laquelle la réaction nystagmique doit apparaitre chez le sujet normal. Les différentes positions utilisées sont codifiées par les positions de Brunnings :

- position I : tête fléchie en arrière de 60 degrés. Ainsi le canal horizontal se trouve dans un plan vertical et donc dans le plan d'excitation. On obtient un nystagmus horizontal.

- position II : tête fléchie en arrière de 60 degrés et inclinée de 45 degrés du côté de l'oreille irriguée. On observe un renforcement du nystagmus horizontal.

- position III : tête fléchie en arrière de 60 degrés et inclinée de 45 degrés du côté non irrigué. On observe un nystagmus rotatoire.

- position IV : tête fléchie en avant de 60 degrés soit 180 degrés par rapport à la position I. On observe un nystagmus horizontal mais de direction inversée par rapport aux positions I et II

Les résultats :

Chez le sujet normal :

Ceux-ci apparaissent après une certaine latence d'une durée moyenne de 15 à 45 secondes. Quant au temps de la réaction il varie entre une et deux minutes.

En cas de lésion :

Inexcitabilité totale : absence de tout nystagmus et de toute réaction vestibulaire subjective et objective, même après injection massive de 100 à 200 cm3.

Hypoexcitabilité faible avec 20 à 30 cm3

Hypoexcitabilité forte avec plus de 50 cm3.

Hypoexcitabilité très forte avec une injection massive de 100cm3 d'eau froide à 15° pour faire apparaitre une réaction de faible intensité et de courte durée.

Hyperexcitabilité : temps de latence raccourci
temps de réaction augmenté

En cas d'atteinte périphérique de l'appareil vestibulaire, l'hypoexcitabilité est globale portant aussi bien sur le nystagmus horizontal que rotatoire et aussi sur la déviation des index et la sensation vertigineuse.

La déviation des index se fait dans le sens du courant endolymphatique, vers l'oreille irriguée. Son seuil est un peu plus élévé que celui du nystagmus. Elle porte sur les deux index de façon symétrique.

La sensation vertiginause est légère chez le sujet normal. En cas de lésion périphérique elle est vive en cas d'hyperexcitabilité, faible ou nulle en cas d'hypoexcitabilité.

L'épreuve calorique bilatérale :

Elle consiste à réaliser une irrigation simultanée et égale des deux oreilles. Normalement il n'y a aucune réaction. En cas d'hyperexcitabilité, on obtient une sensation vertigineuse avec nystagmus vertical supérieur. En cas d'inégalité de l'excitabilité entre les deux la byrinthes, on observe comme dans l'épreuve unilatérale une réaction labyrinthique avec nystagmus dirigé du côté le moins excitable.

L'épreuve rotatoire :

Ici la rotation à vitesse uniforme (10 tours en 20 secondes par exemple) induit l'apparition d'un nystagmus au départ. Celui-ci cesse pour s'inverser quelques secondes plus tard. A l'arrêt brusque se produit de nouveau un contre-nystagmus. C'est ce dernier qui est généralement étudié.

Selon le plan de rotation utilisé, on peut exciter séparément chaque couple de canaux. Pour cela, il suffit, le sujet étant assis dans le fauteuil tournant,de modifier les positions de la tête comme pour l'épreuve calorique. C'est ainsi que :

- Le nystagmus horizontal s'obtient par rotation autour de l'axe vertical : tête inclinée de 30 degrés vers l'avant. Il dure 25 à 40 secondes.

- Le nystagmus rotatoire s'obtient par rotation autour de l'axe fronto occipital; tête rejetée en arrière. Durée 15 à 20 secondes.

- Le nystagmus vertical s'obtient par rotation autour de l'axe bitemporal, tête inclinée sur l'épaule. Durée 6 à 8 secondes.

Si l'on utilise une table tournante, le nystagmus rotatoire se recherche dans le décubitus dorsal et nystagmus vertical dans le décubitus latéral.

La déviation se fait suivant le plan de rotation.

La sensation vertigineuse est nettement plus marquée qu'au cours de l'épreuve calorique, notamment pour la rotation dans le plan frontal et le plan sagittal.

Les résultats sont les mêmes que pour les épreuves caloriques. En cas d'hypoexcitabilité vestibulaire, la durée et l'intensité du nystagmus sont diminuées,les phénomènes vertigineux absents ou peu marqués. En cas d'hyperexcitabilité il existe uniquement une accentuation de la sensation vertigineuse, des nausées et des vomissements sont possibles.

L'épreuve galvanique :

Elle consiste à étudier les réactions provoquées par le passage d'un courant galvanique au niveau de l'appareil labyrinthique au moyen d'électrodes.

Chez le sujet normal, les seuils varient entre 2 et 8 milliampères, mais chez un même sujet les seuils de chaque côté sont identiques.

Le seuil d'apparition du nystagmus est de 3 à 5 milliampères pour une excitation bipolaire biauriculaire et de 8 à 10 milliampères pour une excitation monopolaire monoauriculaire.

Le nystagmus est horizontal rotatoire ou rotatoire pur et dirigé vers le pôle négatif.

La réaction d'inclinaison de la tête apparait avec un seuil plus bas que le nystagmus.

Le vertige est plus ou moins prononcé, le plus souvent le sujet se sent attiré du côté opposé au pôle négatif.

Recherche du nystagmus de position :

On tient compte ici du nystagmus apparaissant dans le regard direct.

C'est l'apparition d'un nystagmus spontané pour une certaine position de la tête ou la modification des composantes d'un nystagmus spontané pour certaines positions de la tête.

Le stimulus doit être considéré comme une augmentation de l'intensité irritative déjà existante, augmentation suffisante pour modifier les signes objectifs spontanés.

A côté de ces méthodes utilisées depuis longtemps mais auxquelles on peut reprocher le manque de finesse sont apparues depuis quelques années des techniques qui permettent une analyse plus scientifique de l'appareil vestibulaire.

La Cupulométrie :

Quelles qu'en soient les modalités, elle nécessite un appareillage important et une durée d'examen prolongée.

Son principe est de créer dans l'ampoule des canaux semi-circulaires étudiés, uniquement une déviation de la cupule à l'exclusion de tout courant endolymphatique. Pour ce faire, l'accélération de la rotation est très lente et progressive jusqu'à l'obtention de la vitesse angulaire de 180 degrés par seconde. On maintient cette vitesse pendant trois minutes puis on pratique l'arrêt brusque immédiat. De la sorte, il n'apparait pas de nystagmus perrotatoire et il devient possible d'analyser isolément le nystagmus post rotatoire. Ici aussi la tête du sujet est maintenue dans le plan adéquat de façon à obtenir des réponses provenant uniquement des canaux stimulés.

On mesure la durée du vertige, la durée du nystagmus enregistré par l'électronystagmographie.

L'électronystagmographie :

Elle réalise un apport considérable pour l'étude des réponses de l'appareil vestibulaire aux stimulations qui lui sont imprimées.

Le procédé repose sur le principe de Dubois-Reymond, de l'existence d'une activité bioélectrique permanente de la rétine qui est de charge négative tandis que la cornée est positive. Le globe oculaire constitue ainsi un dipole cornéo-rétinien dont l'axe coincide avec l'axe optique. Le potentiel rétinien de repos est constant chez un même sujet. A chaque déplacement de l'oeil dans l'orbite correspond une modification de la répartition des potentiels dans la région périorbitaire. Cette variation du champ électrique périoculaire est fonction de l'angle de rotation du globe oculaire autour de son axe (Fenn et Hursch). Au moyen d'électrodes placées dans la région périoculaire, les variations de potentiel traduisant les déplacements de l'oeil sont recueillies, amplifiées et enregistrées à l'aide d'un électronystagmographe.

Ce procédé permet aussi l'enregistrement, même en chambre obscure ou le sujet ayant les yeux fermés, des mouvements oculaires et donc du nystagmus. Mais surtout une étude très minutieuse des composantes du nystagmus devient possible.

La Vestibulométrie :

Il était naturel que, pour apprécier l'intensité de la sensation vertigineuse qui résulte d'une altération des fonctions vestibulaires, l'on s'attache à rechercher une méthode de quantification.

Montandon, le premier, a remarqué qu'à chaque accélération ou décélération d'un mouvement de rotation du corps dans l'espace correspond un mouvement inconscient des yeux du à l'excitation des récepteurs vestibulaires. Ce déplacement des globes oculaires constitue un réflexe enregistré grâce à l'électro nystagmographie. A un certain degré d'accélération de la vitesse de rotation survient le nystagmus. L'appareil enregistreur étant capable de tracer dès sa première manifestation le mouvement nystagmique permet ainsi d'établir le seuil d'apparition du nystagmus vestibulaire.

Ce dernier correspond, par définition, à la plus petite accélération de la rotation capable de faire naitre et d'entretenir un nystagmus d'un battement par seconde.

L'accélération rotatoire ou accélération de la vitesse angulaire se mesure en degrés d'angle parcourus seconde par seconde.

Le seuil normal nystagmique est situé chez l'homme aux alentours de 1 degré par seconde 2

On dispose par ailleurs d'un gnographe, stimulateur rotatoire de haute précision.

Le seuil une fois établi, on peut effectuer à partir de ce niveau de référence toutes les mensurations désirables pour l'observation de la fréquence du nystagmus.

Chronaxies Vestibulaires

Cette mesure dérive de l'épreuve galvanique et consiste à mesurer la vitesse de l'excitabilité.

Nous avons vu que lors d'une excitation galvanique il se produit une inclinaison de la tête du côté du pôle positif. En utilisant la méthode monoauriculaire on recherche tout d'abord la rhéobase : plus petite intensité du courant de fermeture faisant apparaitre la réaction. Puis on recherche la chronaxie : temps minimum de passage du courant nécessaire pour obtenir le seuil, l'intensité du courant ayant une valeur double de la rhéobase.

Chez l'homme on trouve normalement 22/1000 de seconde, le pôle positif étant dans l'oreille et 26,4/1000 de seconde avec le pôle négatif.

Toutes les méthodes que nous venons d'énoncer brièvement permettent l'étude du fonctionnement global de l'appareil vestibulaire ou des canaux semi-circulaires. Envisageons quels sont les moyens dont on dispose pour étudier isolément le comportement des otolithes.

Gegenrollung :

Chez l'individu normal, l'inclinaison latérale de la tête (dans le plan frontal) entraine une contre rotation des yeux.

Phénomène déjà observé en 1906 par Barany et repris ces dernières années par Miller en 1961 et Schoene en 1962.

Ce mouvement de compensation oculaire est sous la dépendance de deux réflexes : réflexe otolithique utriculaire d'une part et réflexe ayant pour point de départ les muscles et les articulations du cou (sensibilité proprioceptive) d'autre part. Ce dernier est déclenché par un changement de position de la tête par rapport au tronc. Il en résulte que la Gegenrollung d'ordre labyrinthique doit être recherchée par inclinaison latérale dans le plan frontal de tout le corps, la tête conservant par rapport au tronc sa position rectiligne normale. Des méthodes utilisant des mouvements de va et vient sinusoïdaux de translation dans le plan horizontal et vertical ont été décrites par Bergstedt en 1961, Jongkees, Bos et Philipzoon en 1962 et par Sasaki en 1967.

Comme il s'agit d'un angle très petit entre 4 et 16 degrés, la contrerotation n'est pas toujours facile à observer. En clinique, on cherche un repère nettement visible tel que vaisseau de la sclérotique ou strie de l'iris. On observe le déplacement du repère par rapport à une croix tracée sur les lunettes de Bartels. On tend de plus en plus à utiliser l'enregistrement par photographies.

Les Epreuves de Fluix :

Cet auteur a décrit des épreuves permettant une étude séparée des réponses de l'utricule et du saccule.

Examen utriculaire :

Les lapilli de forme rectangulaire, courbés en un angle de 140° présentent une partie antérieure oblique petite et une partie postérieure horizontale plus grande.

La pression de l'otolithe est maximum lorsque la tête est penchée de 30 degrés en avant (position normale). Dans cette position il y aurait augmentation du tonus des fléchisseurs et du droit supérieur.

La pression de l'otolithe est, par contre, minime lorsque la tête est penchée en arrière de 180° par rapport à la position précédente, dans cette position il y aurait augmentation du tonus des extenseurs et du droit inférieur.

S'il y a irritation d'un lapillus ou mieux de deux lapilli, il y a déviation des deux bras vers le bas (dans le plan sagittal), déviation d'autant plus marquée que la tête est renversée en arrière vers la position pessima.

S'il y a paralysie, la déviation se fera vers le haut et sera plus nette lorsque la tête sera en position optima, c'est-à-dire, penchée en avant de 30°.

Examen sacculaire :
La sagitta est courbée en son milieu en un angle de 160 degrés.

La position optima d'un sagitta correspond à la position minima de celle du côté opposé.

L'augmentation de pression agit sur les abducteurs homolatéraux et les adducteurs controlatéraux.

La pression est maxima lorsque la tête est inclinée de 55 degrés vers l'épaule et un peu inclinée en avant.

S'il y a irritation de la sagitta gauche par exemple, la sagitta placée en position minima (tête inclinée sur l'épaule gauche); on obtiendra une déviation du bras gauche en dehors.

S'il y a para lysie de la sagitta gauche on placera la sagitta gauche en position optima (tête inclinée sur l'épaule droite), on obtiendra une déviation du bras gauche en dedans.

METHODES D'ACQUISITION PLUS RECENTE :
L'excitation de l'appareil vestibulaire entraine un déplacement des globes oculaires. Celui-ci peut être à l'origine d'une illusion de mouvement et, par là, d'illusions visuelles. L'influence d'un changement de direction et d'amplitude des forces résultantes sur les perceptions visuelles a été repris ces dernières années. Les organes otolithiques jouent un rôle prédominant dans ces effets : oculogravic illusion (Graybiel 1952, Witkin 1950) ; oculoagravic illusion (Gerathewohl et Stallings 1958) ; elevator illusion (Niven, Whiteside et Graybiel 1963) l'illusion qui apparait peut être mesurée et testée.

Huguenin en 1968 a exposé une méthode utilisant des stimulations combinées : stimulation électrique stéréotaxique par électrodes implantées de l'aire diencéphalique nystagnogène d'une part et stimulation gravitationnelle d'autre part. Il est évident qu'une telle méthode n'est réalisable que chez l'animal.

Il ressort de cette revue succinte des méthodes d'exploration de l'appareil vestibulaire qu'un examen minutieux ne peut être pratiqué qu'à l'aide d'un appareillage important, dans une salle d'examen et exige même, pour certaines d'entre elles, l'usage d'un véritable laboratoire. Toutes conditions impossibles à réaliser en pratique chez l'aviateur ou le cosmonaute au cours de sa fonction. Ainsi le plus souvent on tiendra compte, avant tout, des réaction subjectives et de lignée neuro-végétatives ou des sensations anormales décrites. On pourra s'appuyer aussi sur l'étude sommaire du maintien de l'équilibre et des possibilités d'orientation dans l'espace conjointement aux données fournies par les appareils de contrôle. On s'attachera à déterminer les possibilités de repérage de l'horizontale par rapport au corps en dehors de toute participation de la vision. Enfin, on utilisera des tests simples et astucieux qui seront décrits en même temps que les observations qui en découlent. L'examen correct du fonctionnement de l'appareil vestibulaire ne restant possible, actuellement, qu'une fois l'expérience terminée, le sujet revenu au sol. Cependant, nous verrons qu'il a été possible, chez l'homme, de pratiquer quelques épreuves vestibulaires au cours du vol.

GENERALITES SUR LA PHYSIOPATHOLOGIE DU VESTIBULE CHEZ L'AVIATEUR

Au sol l'homme est habitué à se mouvoir dans les plans horizontal et frontal. Quant au troisième plan, il demeure constant, c'est la force de pesanteur.

Les Forces susceptibles d'agir sur l'appareil vestibulaire au cours du vol :

Au cours du vol, l'avion peut être soumis à des mouvements multiples, dans les trois plans de l'espace. Ainsi la force de pesanteur se trouve modifiée de façon presque permanente pour donner une résultante qui n'est plus la force de référence habituelle. Dans certains cas même l'avion passe dans la zone d'apesanteur, pendant une brève durée, il est vrai.

Bien des facteurs interviennent ici pour modifier les données physiologiques habituelles. Certains d'entre eux influent plus spécialement sur l'équilibre. Ce sont la vitesse, les différentes accélérations que l'appareil vestibulaire ne pourra pas toujours identifier ou identifiera de façon erronée. Ce sont les modifications que subissent la sensibilité profonde et la vision et dont nous connaissons les connexions étroites avec le vestibule. En réalité, la vitesse n'agit pas directement sur les fonctions sensorielles. Elle place le sujet dans des conditions favorisant les illusions. Elle peut dépasser le temps de latence d'une réaction. Sans parler d'autres facteurs qui interviennent indirectement : diminution de la pression partielle d'oxygène, le bruit, les vibrations, les rayonnements, le froid...

Avec la vitesse et les accélérations, l'aviateur se trouve soumis en permanence à différentes forces :
Accélération rectiligne, accélération centripète et centrifuge, accélaration angulaire. La résultante des accélérations qui peuvent varier en grandeur et en direction est de soumettre l'aviateur à des forces d'inertie, opposées à celles de l'accélération mais fonction d'elles ainsi que de son poids. Ces forces enfin peuvent s'exercer dans des sens différents.

Au cours d'une accélération angulaire, deux types de forces peuvent s'exercer, de sens opposé et qui sont communément dénommées : tête-siège ou siège-tête. Dans le premier cas, la force d'écrasement tête-siège sera d'autant plus élevée que le virage est plus serré et la vitesse plus grande. Si l'on suppose une force centripète exercée de six grammes, un aviateur pesant 75 Kgs au sol sera maintenu sur son siège par une force de 450 Kgs, les membres eux-mêmes deviennent six fois plus lourds. Il est évident qu'un tel phénomène peut engendrer certains troubles. Ainsi, au cours de ce virage, si le pilote effectue un mouvement brusque de la tête et si ce déplacement est dans un plan différent de celui du virage, une nouvelle force va apparaître, dite force composée et qui peut provoquer l'effet Coriolis, l'exagération des forces siège-

tête est aussi génératrice de troubles vestibulaires suivant les mêmes modalités. Ces dernières ne peuvent apparaître que lors d'un vol tête en bas.

Au cours des accélérations rectilignes ce sont les forces ventre-dos ou dos-ventre qui surviennent. Les premières ont lieu au décollage et tendent à plaquer le pilote contre le dossier. Les autres ont lieu à l'aterrisage et sont de sens opposé. Ces forces ne paraissent pas jouer de rôle vis à vis de l'équilibre. Par contre l'accélération rectiligne suivant le plan sagittal de l'avion peut favoriser des troubles à l'occasion de trous d'air, de rafales.

En réalité, ce n'est pas tel ou tel mouvement selon tel axe qui peut entraîner des perturbations, c'est le mouvement composé selon plusieurs axes ou le passage rapide de l'un à l'autre. En effet, les accélérations, qu'elles soient angulaire ou rectiligne doivent atteindre un certain seuil pour être perceptibles par l'appareil vestibulaire.

Ce seuil a été recherché. On le chiffre à deux degrés et cinq secondes pour l'accélération angulaire. Un autre point à souligner est, dans l'accélération rectiligne, l'importance jouée par la sensibilité profonde, témoins les forces dos-ventre ou ventre-dos précitées et par la vision pour le sens et la grandeur du mouvement. Il ne faut pas oublier enfin qu'au cours de l'accélération angulaire, la notion de celle-ci ne sera donnée par les canaux semi-circulaires qu'au début et à la fin de sa mise en jeu, du fait des lois d'inertie régissant les déplacements de l'endolymphe.

LES INCIDENCES PHYSIO PATHOLOGIQUES :

Celles-ci se trouvent dominées par la possibilité d'interprétations erronées de la part de l'appareil vestibulaire.

Dans sa forme la plus complète, l'altération de la fonction vestibulaire détermine le mal des airs associant vertiges, nausées, vomissements, angoisse. Ces signes résultent des excitations inhabituelles du labyrinthe et en contradiction avec les informations reçues par les autres organes des sens. Une dysharmonie s'établit, entrainant une désorientation de tous les centres bulbo-protubérantiels et finalement une perturbation de l'activité neuro-végétative.

A côté du mal des airs, d'autres phénomènes, véritables illusions labyrinthiques peuvent survenir.

Celles-ci sont nettement favorisées par le pilotage sans visibilité.

Ainsi, au cours d'un virage à plat, comme nous l'avons vu seul le début et l'arrêt du virage sont enregistrés. Entre ces deux étapes l'aviateur n'éprouve plus de sensation et peut être ainsi amené à serrer davantage son virage. Inversement lorsque cesse le virage il peut être amené à trop redresser et prendre une direction opposée. Ces erreurs ne peuvent

être évitées, en l'absence d'appareils de contrôle que par le contrôle de la vue.

Si l'avion dévie faiblement, cette déviation peut-être insuffisante pour stimuler l'appareil vestibulaire (excitation infra-liminaire) et en cas de redressement brusque, la sensation est enregistrée mais devient surestimée.

Dans le cas d'un virage très serré, l'appareil étant incliné, la force tête siège excite les otolithes ce qui peut donner une fausse impression de montée. A l'inverse, à la fin du virage peut apparaitre une fausse impression de descente. Ici l'ensemble du vestibule est excité : canaux semicirculaires et appareil otolithique. Suivant la vitesse et la grandeur du rayon la sensation sera plus ou moins intense. Elle pourra aller jusqu'au vertige avec nystagmus.

Cependant au cours de ces précédentes situations la vision supplée les défaillances éventuelles de l'appareil vestibulaire. Il en est tout autrement lors du vol sans visibilité.

Ainsi lors d'un virage, le pilote devient incapable d'apprécier le degré d'obliquité de son appareil. En effet la résultante des forces demeure toujours perpendiculaire à l'axe transversal de l'appareil. Si l'obliquité de l'appareil se modifie, la résultante des forces se déplace à l'extérieur et le pilote peut avoir l'impression de s'incliner dans le sens opposé. Cette impression peut aller jusqu'à la sensation de rotation suivant les trois axes et entrainer de violents vertiges.

L'effet Coriolis déclenche des vertiges très violents, mais il n'apparait que pour des virages très serrés, une vrille, un tonneau.

Le vertige lorsqu'il survient s'accompagne volontiers d'un nystagmus. Ce dernier peut à lui seul être à l'origine d'illusions visuelles.

Non seulement la vision peut se trouver dans l'incapacité de s'exercer mais elle peut aussi devenir le siège d'illusions. C'est ainsi qu'en volant entre les nuages, le pilote perd la notion du plan horizontal et son appareil subit une inclinaison inconsciente. La nuit le pilote doit utiliser des repères lumineux, mais ceux-ci ne permettent pas une appréciation réelle de la distance ou de l'altitude. Cette notion prend toute son importance lorsqu'il s'agit des lumières balisant le terrain d'aterrisage. Les deux rangées parallèles de la piste donnent l'impression d'un V renversé vertical. Des lumières clairsemées peuvent évoquer un ciel étoilé, la fixation d'un point lumineux au sol donne rapidement, en huit à dix secondes l'impression d'être en mouvement.

Cette anomalie est vraisemblablement liée à l'apparition du nystagmus de fixation.

Ces différentes perturbations du jeu normal de l'appareil vestibulaire et de la vision ne peuvent être corrigées

par la volonté. Il s'agit d'illusions auto-cinétiques que seuls les appareils de bord sont capables de redresser. La troisième fonction de l'équilibre, la sensibilité profonde, ne parait pas jouer un rôle aussi important qu'au sol. Elle ne peut en effet exister que par rapport à l'avion. Cependant chez un pilote exercé, la pression des commandes au niveau des extrémités déclenche des réactions motrices adéquates, pour le maintien de l'appareil en ligne normale. Il est évident qu'ici la sensibilité tactile intervient.

Tout comme le vestibule et la vision, la sensibilité profonde peut être perturbée. Les réactions motrices ne concordent pas toujours avec les gestes qui devraient être exécutés, souvent du fait des fausses incitations ressenties par l'appareil vestibulaire. Au cours d'une descente par exemple, les otolithes peuvent déclencher des réflexes d'extension des membres qui peuvent exagérer l'action d'appui sur les commandes. Au cours d'un virage, l'importance de la résultante des forces exige des membres devenus beaucoup plus lourds, une action musculaire supérieure à la normale pour exécuter les mouvements indispensables à la manoeuvre de l'appareil.

L'anoxémie, le froid, les variations de pression barométrique, le bruit bien que leur intervention soit de plus en plus limitée sur les appareils modernes peuvent être à l'origine de perturbations organiques et s'exercer entre autre sur la fonction de l'équilibre.

LES MOYENS DE CORRECTION :

La grande majorité des perturbations qui viennent d'être sommairement rapportées n'apparaissent que pour des conditions inhabituelles de vol.

Les différents appareils de bord renseignent de façon constante et permanente le pilote sur la position exacte de l'appareil, non seulement par rapport aux trois plans de l'espace, mais aussi par rapport au sol. Sa situation géographique est toujours connue, même en l'absence de tout repère terrestre. La vision et même la sensibilité profonde sont supplées par des données instrumentales. En raison de la stabilité habituelle des avions de ligne, de la détection automatique des zones de turbulence, la possibilité des illusions labyrinthiques est extrèmement réduite.

A ces données, en quelque sorte mécaniques, vient s'ajouter l'adaptation progressive du pilote à évoluer dans l'espace à trois dimensions. L'adaptation progressive est un phénomène bien connu. Très rapidement un pilote qui au cours des premiers vols pouvait accuser des phénomènes vertigineux , verra ceux-ci disparaitre progressivement. Son système vestibulaire s'habitue.

Cette évolution est parfaitement shématisée par les courbes des sensations vertigineuses successives, établies au cours des examens de cupulométrie. La sensation vertigineuse

est de plus en plus réduite. On peut distinguer deux stades appelés l'adaptation I et l'adaptation II. Le premier est acquis spontanèment très vite, le second est plus long à apparaître (Beauchamp, Bordes, Robert). Ce dernier est obtenu en apprenant au pilote à se fier à sa vue et à se défier des impressions provenant de son vestibule (séances de Link TRAINER). Certains pilotes chevronnés savent même lutter contre les effets de l'accélération de Coriolis. GILLINGHAM a observé qu'ils effectuent des mouvements vigoureux de la tête lorsqu'une désorientation spatiale apparait ou est sur le point d'apparaitre : mouvements d'antéro pulsion et de rétropulsion de la tête, mouvements combinés au hasard dans les plans vertical et horizontal, inclinaison du corps à 60 degrés, mouvement de rotation de la tête autour de l'axe cervical. De telles manoeuvres réduisent notablement les fausses impressions ressenties par les pilotes chez 60% d'entre eux selon BENSON. Elles permettent aussi à ces pilotes de conserver une notion assez exacte du degré de l'accélération angulaire subie par l'appareil.

L'adaptation ne résulte pas d'un affaiblissement sensoriel, mais d'une diminution de la crédulité des centres supérieurs à l'égard des informations venues du vestibule. Nous l'avions déjà noté à propos de l'habituation vestibulaire.

Dans quelques cas, cette adaptation peut cesser brusquement, réalisant le syndrome psycho-labyrinthique (Beauchamp, Bordes). Celui-ci peut se traduire par une sensation de désorientation légère, parfois par des sensations imprécises de malaise, d'anxiété. La courbe de la sensation vertigineuse redevient bientôt normale. Cependant, même chez l'aviateur entrainé, un élément peut venir perturber l'adaptation du pilote dans ses fonctions, c'est la fatigue. Son apparition est favorisée par l'attention soutenue permanente qu'exige la conduite de l'appareil par le contrôle constant des divers instruments de bord dont le nombre et la complexité sont grands par l'appréciation continuelle des contacts proprioceptifs des diverses commandes. La fatigue peut se traduire par une lecture défectueuse des appareils de bord, par un allongement du temps de latence des diverses réactions sensorielles et motrices entrainant des manoeuvres fausses ou retardées.

En résumé, au cours du vol aérien, la force de pesanteur peut varier aussi bien en grandeur qu'en direction. Un tel phénomène fait apparaitre la possibilité d'illusions sensorielles d'origine vestibulaire. Dans certains cas un vertige accompagné de son cortège neuro-végétatif survient. Les autres fonctions sensorielles et en particulier la vision, suppléent dans une large mesure aux défaillances de la fonction du vestibule. L'entrainement et l'habitude réduisent de façon notable les troubles d'origine labyrinthique. Ces notions sont extrèmement précieuses avant d'aborder l'étude de la fonction du vestibule lorsque la force de gravité devient nulle.

LES METHODES PERMETTANT DE REALISER L'ETAT D'APESANTEUR

Rappel de quelques notions physiques élémentaires sur la pesanteur :

La pesanteur n'est qu'un cas particulier de la gravitation universelle telle qu'elle fut énoncée par NEWTON : "Deux corps matériels exercent l'un sur l'autre une force qui est proportionnelle à la masse de ces deux corps et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare".

Ainsi en un lieu donné la pesanteur est une force constante en grandeur et en direction et qui résulte de l'attraction que la terre exerce sur un corps placé à sa surface.

Cette force régit la chute des corps à savoir : "tout corps abandonné à lui-même dans le vide est soumis à un mouvement uniformément accéléré, accélération égale à g = 981 centimètres par seconde²

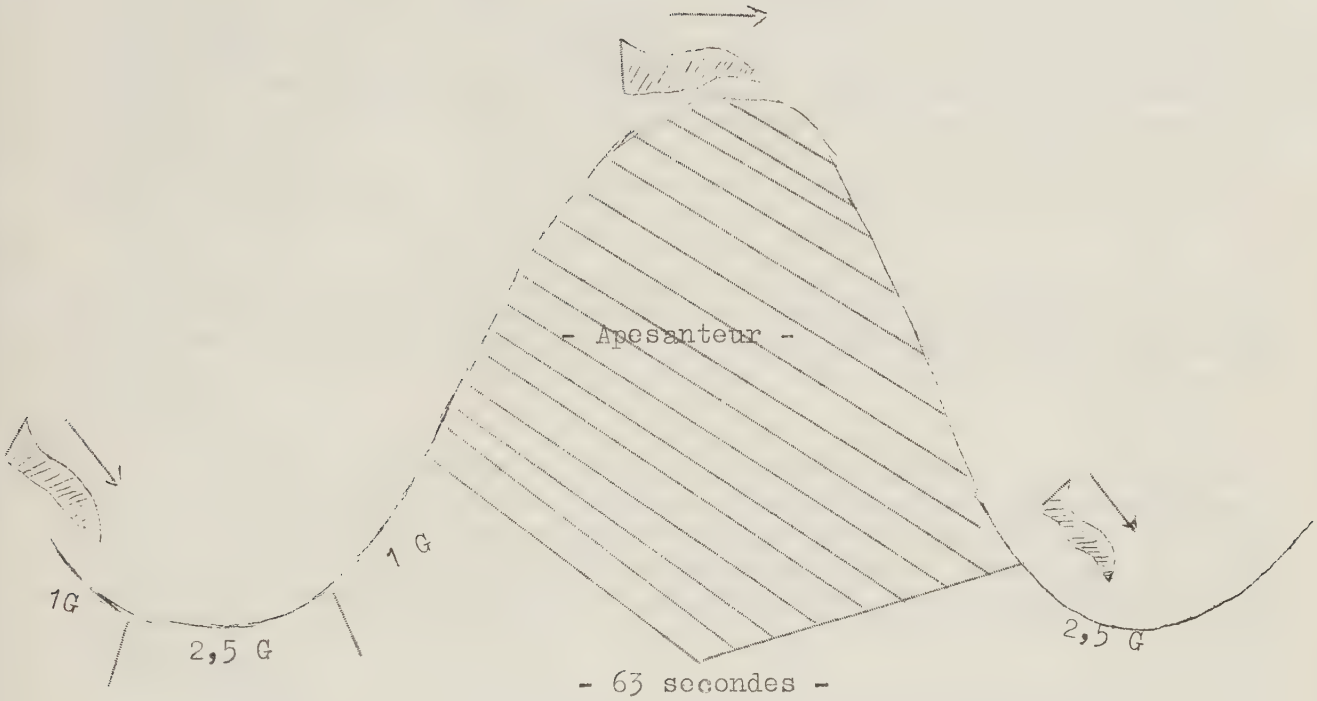
Cependant la pesanteur n'est pas la seule force qui s'exerce sur les corps à la surface de la terre; ceux-ci sont en même temps sollicités par la force centrifuge due à la rotation de la terre. L'existence de cette force centrifuge expliquerait d'ailleurs la forme ellipsoïdale de notre planète car la force centrifuge est plus importante à l'équateur qu'aux pôles. C'est ainsi qu'on a calculé que si la terre tournait 17 fois plus vite sur elle-même, la force centrifuge annulerait la force de la pesanteur à l'équateur.

Du fait des variations de l'épaisseur de la terre, la valeur de la pesanteur varie donc selon les points du globe considérés. Ces variations demeurent cependant négligeables.
De ces notions, il ressort que l'apesanteur ou impesanteur n'existe à l'état naturel que dans l'espace là où l'attraction exercée par les astres s'annule.

Expérimentalement l'augmentation de la pesanteur est de réalisation aisée par l'utilisation de centrifugeuses; cette méthode a été largement utilisée notamment pour l'étude de la physio-pathologie chez l'aviateur et aussi chez le cosmonaute face aux accélérations considérables auxquelles ils pourront être soumis. Beaucoup plus difficile est la réalisation de l'apesanteur.

LES METHODES :

Leur réalisation pratique est récente, elle devint nécessaire dès qu'il apparût possible d'explorer l'espace. La réalisation théorique de l'absence de pesanteur à la surface ou au voisinage de la terre n'est concevable qu'en soumettant le corps à une force exactement égale et de direction inverse à celle de g. Ainsi est-il nécessaire de soumettre le corps à un certain déplacement. On parlera donc d'apesanteur "dynamique" par opposition à l'apesanteur "statique"



- Représentation du vol parabolique d'après Campbell -

qui n'existerait qu'en dehors de tout champ d'attraction.

= Un certain nombre de techniques ne font que simuler l'apesanteur. Ainsi a-t-on étudié le comportement de sujets placés au repos absolu pendant une longue période ou placés dans une cuve à eau de telle sorte que la poussée d'Archimède égalise la pesanteur. Ces méthodes permettent d'étudier un organisme dont les mécano récepteurs deviennent incapables d'exercer leur action et si l'on supprime en outre tout repère visuel, il devient possible d'étudier isolèment la contribution de l'appareil vestibulaire au maintien de l'équilibre. De telles recherches ont été entreprises bien avant qu'on s'interesse à l'apesanteur.

= Un véritable état d'apesanteur peut être expérimentalement réalisé :

- Dans la période initiale d'un saut dit en chute libre pendant la fraction de seconde précédant la constitution d'une vitesse constante due à la résistance de l'air. De même lors du passage à grande vitesse sur un "dos d'âne" ou encore en ascenseur.

- A bord d'un avion effectuant une ressource décrivant une parabole à la suite d'un piqué. CAMPBELL à qui nous empruntons le shéma ci-contre a montré que de cette manière la durée théorique du vol en apesanteur est de 63 secondes avec les appareils les plus rapides. En pratique de 53 secondes ce qui a permis, nous le verrons, les premières études déjà riches en enseignement.

- Pendant la période balistique du vol d'une fusée hors de l'atmosphère, les forces qui s'exercent sur le mobile et son contenu s'annulent, les sujets se trouvent ainsi dans un champ de pesanteur nulle. La durée de l'apesanteur atteint plusieurs minutes. De nombreuses études chez l'animal ont été ainsi pratiquées.

- Au cours d'un vol orbital. Dans ce cas le véhicule se trouve au dessus de l'atmosphère, il se déplace parallélement à la surface de la terre à une vitesse constante de l'ordre de 30.000 kms à l'heure. La force centrifuge qui s'exerce sur le véhicule et son contenu équilibre de la sorte exactement la force d'attraction terrestre. Ici la durée d'apesanteur est liée à celle du vol et demeure plusieurs heures ou plusieurs jours.

- Au cours d'un voyage interastral la pesanteur est nulle pendant toute la période ou aucun moyen de propulsion n'est plus utilisé. Les forces d'accélération ou de déccélération subies par le véhicule et son contenu sont en effet égales et de directions inverses à celles de g comme pour tout vol balistique.

- En 1958 LOMONACO, SCANO et ROSSANIGO ont construit une tour de subgravité qui permet la réalisation de brèves périodes d'apesanteur. Le principe en est le suivant : le sujet est placé sur un siège suspendu par des tendeurs élastiques, le siège chute d'une hauteur de l'ordre de 15 Mètres puis les

tendeurs le ramènent à une position voisine de celle du départ. Il passe alors par une phase d'apesanteur avant de rechuter. On obtient de la sorte une succession d'états d'apesanteur entrecoupés d'états d'hyperpesanteur mais la durée totale de l'expérience est de quelques dizaines de secondes.

- Le centre d'études et de recherches de Médecine Aéronautique et spatiale de ROME a également construit un appareillage dénommé axe de subgravité. Plus tard a été conçu aux U.S.A. le "4 Compensator" décrit par GORDON et qui permet de créer mais dans de très petits volumes l'apesanteur en utilisant la loi de la chute des corps en dehors de tout freinage.

Ces différentes méthodes seront utilisées pour les observations que nous allons rapporter.

PHYSIOPATHOLOGIE DU VESTIBULE EN APESANTEUR

INTRODUCTION :

En matière de médecine spatiale, les problèmes relatifs au fonctionnement du sens de l'équilibre occupent une importance primordiale. Ces problèmes selon Bergstedt peuvent être divisés en trois grands groupes :

I°- Ceux en relation avec les accélérations linéaires de grande amplitude auxquelles sont inévitablement soumis les cosmonautes en particulier lors des phases initiales et terminales du vol.

2°- Ceux en relation avec l'apesanteur.

3°- Ceux en relation avec les stations orbitales tournantes dont il semble que la création devienne bientôt nécessaire.

Le premier groupe a été largement exploré bien avant l'ère spatiale et notamment chez l'aviateur. Nous en avons relaté les principales incidences sur le vestibule. Des études ont été reprises chez les futurs cosmonautes qui ont été soumis au sol à des accélérations considérables en centrifugeuses. Ces accélérations reproduisent en tout point celles qui ont lieu au cours du vol spatial (entre 7 et IO g) On a pu tester la résistance à de telles accélérations et prévenir tout dommage pour l'homme en le plaçant dans une position adéquate. Il a été démontré d'autre part que l'appareil otolithique, organe par excellence de l'accélération linéaire ne présente aucun signe d'altération après une exposition même prolongée à IO g. A. GRAYBIEL, Directeur des Recherches du Centre de Médecine aéronautique de Pensacola en Floride a soumis des singes à des accélérations élevées. Après sacrifice, les animaux ont été autopsiés, on a recherché une altération de la structure des organes du vestibule. L'étude au microscope électronique n'a démontré aucune altération, en particulier de l'ultrastructure de la macule.

Les études à propos du troisième groupe sont à peine commencées. Nous en dirons quelques mots en conclusion.
Aussi notre travail porte-t-il uniquement sur le second groupe.

Les études dans le domaine de l'apesanteur ont tout naturellement débutées chez l'animal. Elles se sont poursuivies chez l'homme avant l'ère spatiale. Elles ont été continuées à l'occasion des premiers vols spatiaux. Nous regrouperons donc les observations pour chacune de ces trois périodes en suivant chaque fois la chronologie des publications. Nous relaterons les conclusions des auteurs au terme de chaque observation.

LES OBSERVATIONS CHEZ L'ANIMAL

Dès I95I VON BECK fit des études sur la tortue au cours de vols balistiques en fusée. Il utilise un lot de tortues normales et un lot de tortues labyrinthectomisées. Les animaux utilisés sont choisis parmi une espèce particulière vivant sur les Côtes d'Argentine. Elles présentent la caractéristique d'être carnivores, très voraces et de posséder un long cou ce qui leur permet de saisir leur proie par détente brusque comme les serpents et ce avec une grande précision et une régularité automatique tant que l'appât se présente. Les animaux labyrinthectomisés perdent ces qualités de précision et de régularité mais une réadaptation se produit après trois semaines environ grâce à une suppléance par la vue. En apesanteur apparait chez les tortues normales une incoordination motrice importante au cours de l'alimentation telle qu'elle a été décrite pour cette espèce. Les tortues labyrinthectomisées depuis trois semaines se comportent à peu près normalement. Cependant si chez ces dernières, on supprime la vision il existe une incoordination complète. Chez les tortues normales une accoutumance progressive à l'apesanteur se fait jour avec la répétition des vols, la réadaptation devient complète au bout de 20 à 30 vols.

HENRY et BALLINGER en I952. Souris normales et labyrinthectomisées au cours de vols balistiques en fusées de type V_2 ou Aérobée : Les souris sont placées dans un cylindre logé à l'avant de la fusée et disposé selon le grand axe de celle-ci. Le cylindre est animé d'un mouvement de rotation. Les animaux sont filmés au cours de l'expérience. Une balle en caoutchouc placée dans le champ de la caméra témoigne dès le moment qu'elle flotte librement de l'absence de pesanteur. A la fin des vols les animaux sont récupérés par un système de parachutage. Les études de la physiologie vestibulaire ont eu lieu au cours des vols Aerobee II et Aerobee III.

Au cours d'Aerobee II la cellule cylindrique était divisée en deux compartiments. Dans chacun il existe une planchette fixée à l'une des parois. Les souris normales sont placées dans l'un, les souris labyrinthectomisées dans l'autre. Chaque animal n'a pour seul repère que la planchette qui suit le mouvement de rotation du cylindre.

Au cours d'Aerobee III un seul des deux compartiments possède une planchette. Une souris normale y est placée tandis qu'une autre souris normale est dans le compartiment dépourvu de planchette.

Résultats : Aerobee II : Bien que les deux animaux présentent au début un comportement commun de type émotionnel caractérisé par un redressement de la queue, le comportement au cours de l'apesanteur est nettement différent selon que la souris est normale ou labyrinthectomisée. Presque immédiatement la souris labyrinthectomisée s'accroche à la planchette et tourne suivant la rotation du cylindre. La souris

normale désorientée flotte griffes tendues et ne retrouve son point d'appui initial qu'après une série d'efforts maladroits.

Aerobee III : La souris normale située dans le compartiment avec planchette parvient après un stade de désorientation et avec des efforts à s'agripper à la planchette. La souris normale située dans le compartiment sans planchette, donc sans repère visuel ou tactile continue à flotter selon une attitude caractéristique de désorientation.

CAMPBELL a observé le comportement de poissons rouges au cours de la période d'apesanteur de vols paraboliques. Aucune réaction de frayeur ou d'affolement, les animaux présentent des mouvements lents d'avant en arrière et de haut en bas comme à la "recherche" de la force de gravité.

En I957 GERATEWOHL et STALLINGS. Etude du réflexe labyrinthique de posture chez le jeune chat et le chat adulte lors de la période d'apesanteur de vols paraboliques : l'apesanteur dure vingt à trente secondes. Chez le chat le réflexe de posture, réflexe de redressement n'apparait qu'au bout de la troisième semaine après la naissance. Pendant l'apesanteur les jeunes chats flottent dans n'importe quelle position et ce qu'ils disposent ou non de la vision. Les chats adultes présentent le réflexe de redressement dès le début de l'apesanteur qu'ils soient aveuglés ou non. Ce réflexe cesse au bout de vingt secondes même si l'apesanteur persiste davantage. Les auteurs concluent que l'excitant physiologique des otolithes est non pas l'accélération elle-même, mais la variation de l'accélération.

SHOCK I958-I959 a observé le réflexe de redressement ainsi que la réaction de l'extension des orteils et les réflexes de sautillement de 2 chats normaux, deux chats labyrinthectomisés par section bilatérale du VIII et deux chats ayant subi l'ablation de l'aire vestibulaire corticale. Les chats normaux conservent leurs réflexes de redressement pendant les cinq ou six premières secondes d'apesanteur. A la dixième seconde il disparait. Il en est de même pour le réflexe de redressement de la tête. Quant aux autres réflexes de posture ils disparaissent en apesanteur. Le résultat est identique si les yeux des animaux sont couverts. Un déficit semblable des réflexes labyrinthiques en apesanteur a pu être observé chez les chats ayant subi une ablation corticale de l'aire vestibulaire et dont les réponses restent correctes en vol horizontal. SHOCK considère cependant que les animaux sont moins gravement désorientés et confus en apesanteur que les animaux normaux. Quant aux chats labyrinthectomisés ils ne présentent aucun des réflexes ni en apesanteur ni en pesanteur normale. Les yeux ouverts l'animal ne semble pas désorienté, mais dès qu'on lui couvre les yeux il cherche désespérèment à s'agripper, se débat, essaie de retirer le masque et semble détester la situation qui lui est imposée.

KUZNETZOV en I958 a noté chez le lapin une déviation des globes oculaires dans l'axe vertical au moment du vol sans pe-

santeur. On a observé aussi au moment de l'établissement de cet état des mouvements musculaires. La tête des animaux était brusquement soulevée sur le plateau probablement parce que le tonus des muscles extenseurs n'était plus contrebalancé par la pesanteur.

YUGANOV et coll.en I960 ont filmé les mouvements oculaires d'un lapin pendant un vol en fusée. Ils estiment que l'animal est soumis à une illusion de mouvement qui résulte du déplacement des globes oculaires lequel est déclenché par l'excitation de l'appareil vestibulaire .

KING en I960 étudie les réflexes d'orientation chez le pigeon. Normalement lorsqu'on tient un pigeon et qu'on incline son corps, un mouvement de compensation maintient la tête dans son orientation primitive. Le réflexe existe chez le pigeon normal comme chez le pigeon décérébré. En apesanteur ce réflexe disparait. Ceci semblerait démontrer que les otolithes ne fonctionnent pas en apesanteur.

CHATELIER et coll.en I962 ont fait le rapport des expérimentations françaises effectuées sur le rat au cours de vols balistiques.

Des rats blancs de race wistar sont placés dans une fusée Véronique AGI au cours de vols qui réalisent l'apesanteur. Les animaux sont porteurs d'électrodes implantées à demeure en différents points de l'encéphale. Quoique les phases de non pesanteur aient été assez irrégulières et assez courtes, on observe des phases de baisse d'activité aussi bien au niveau du cortex que de la substance réticulée.

Des résultats analogues ont été retrouvés chez des animaux placés dans des avions Vautour et subissant des périodes d'apesanteur pendant une quarantaine de secondes chaque fois. Les phases ayant été renouvelées une vingtaine de fois. Ici encore on note l'apparition de bouffées d'ondes lentes hypersynchrones de grande amplitude et groupées en fuseau.

En I963 les expérimentations françaises ont porté sur le chat. On enregistre les principales fonctions végétatives, l'E.E.G. et des potentiels évoqués. L'apesanteur obtenue dure cinq minutes environ, l'animal est porteur d'électrodes implantées : deux dans les zones considérées comme associatives : gyrus supra sylvien et gyrus latéral antérieur. Une électrode dans l'aire de projection de la patte antérieure, une électrode dans l'hippocampe ventral et une autre dans la réticulée mésencéphalique. Une stimulation électrique intermittente de la patte antérieure est effectuée pendant toute la durée du vol. Les réponses sensorielles sont recueillies dans l'aire S I contrô-latérale. L'électrocardiogramme, le rythme respiratoire sont également enregistrés. Pendant l'apesanteur on enregistre ici encore des rythmes lents. Ceux-ci débutent dans la zone associative pour gagner ensuite la région somatique. On ne relève par contre aucune modification végétative cardiaque ou respiratoire. Les potentiels évoqués

recueillis au niveau de l'aire S I ne sont pas modifiés en non gravité. Les auteurs déduisent de ces résultats que les informations sensorielles de la substance réticulée pendant l'apesanteur sont globalement diminuées ce qui favoriserait l'apparition de rythmes lents. L'analogie des tracés avec ceux recueillis sur un animal en hypnose dans les conditions habituelles de vie est d'ailleurs remarquable. Autre hypothèse des auteurs : la non gravité agit comme un stimulus nouveau inhabituel, provoquant d'abord une réaction d'orientation (activité désynchronisée) qui par un mécanisme d'inhibition interne empruntant un trajet cortico-réticulo-cortical entrainerait cette activité.

YAZDOWSKI a observé le comportement de rats en apesanteur. Ceux-ci sont très vite désorientés et se mettent à tourner sur eux-mêmes suivant le grand axe du corps. Puis l'animal ralentit ses mouvements et semble s'adapter à ce nouveau mode de vie. Pour l'auteur la signification biologique des réflexes de posture en apesanteur consiste dans la présentation et le rétablissement d'une relation définie de la position et de la posture du corps, uniquement en fonction des objets environnants.

Lors des premiers vols spatiaux soviétiques les chiens Laika, Belka et Stelka ont présenté des modifications fonctionnelles cardiaques pendant les premières heures d'apesanteur : tachycardie, tachypnée et hypertension artérielle chez Belka et Stelka de la huitière à la dixième heure : instabilité du rythme cardiaque, de la fréquence et de l'amplitude du rythme respiratoire chez Laika pendant les six premières heures etc... Tous phénomènes traduisant une instabilité neuro-végétative probablement liée à une modification des afférences sensorielles en apesanteur (GAZENKO et YAZDOWSKI).

YUGANOV et coll.en I962 . LA KITAYEV - SMIJK en I963 ont noté que pendant les premières minutes du séjour à O G des animaux normaux présentent des troubles de la statique, du mouvement, un pouls irrégulier et des phénomènes neuro-végétatifs. Par contre chez les animaux labyrinthectomisés YUGANOV et AFANASYEV en I964 ont pu constater que ces troubles sont bien moins accusés.

En I967GIJALTIEROHI et ALLTACHER enregistrent chez la grenouille les potentiels vestibulaires pendant la période d'apesanteur de vols paraboliques. Les potentiels sont recueillis au moyen de micro-électrodes implantées sur le trajet du VIII exclusivement au niveau des fibres innervant l'appareil otolithique. On compare les potentiels de repos dans les conditions normales et ceux obtenus en apesanteur. Dans ce dernier cas la fréquence des impulsions enregistrées est très diminuée. On enregistre aussi les potentiels pour différentes valeurs de pesanteur inférieures à la gravité . Il semble exister une relation non pas linéaire mais logarithmique entre l'intensité de l'accélération et la fréquence des impulsions recueillies.

La même année des singes Macacus Nemestrina ont été placés dans des fusées Vesta. L'animal est conditionné à une tâche. En mon pesanteur l'animal cesse d'accomplir sa tâche.

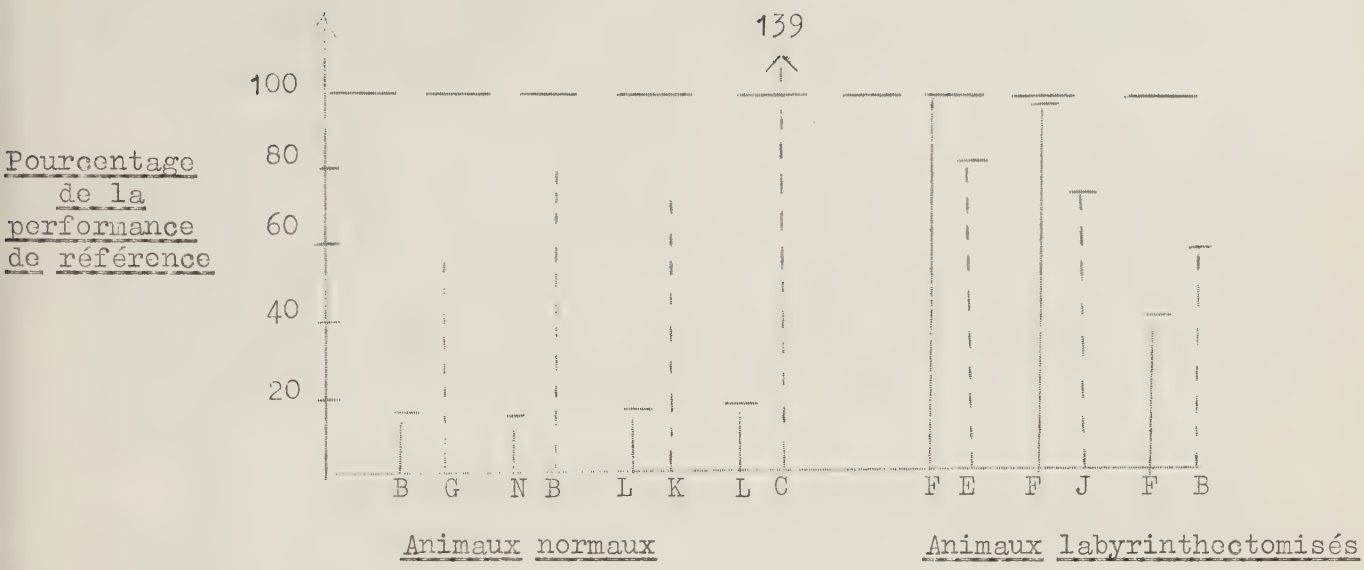
En I968 THACH et GRAYBIEL ont décrit le comportement de singes en apesanteur au cours de vols paraboliques répétés (I27 au total). Sur les sept singes, quatre sont normaux et trois sont labyrinthectomisés. Les animaux ont été au préalable conditionnés à une tâche qu'ils doivent accomplir périodiquement. Elle consiste à manipuler un levier afin d'obtenir de la nourriture. La sensibilité vestibulaire des animaux a été testée avant les expériences. Pour cela 3 tests ont été successivement utilisés : épreuve calorique, épreuve rotatoire et la réalisation de la tâche. Ces différentes épreuves ont apporté la certitude que quatre singes possédaient une fonction vestibulaire normale et que les trois autres en étaient dépourvus. L'étude porte sur des animaux libres placés dans une petite pièce en plexiglass. Ils sont filmés pendant toute la durée de l'expérience. Chaque période d'apesanteur dure vingt cinq secondes en moyenne. Elle est précédée et suivie pendant vingt secondes d'hyperpesanteur n'excédant pas 2 g.

On note les performances accomplies par chaque animal :
I°- pendant la période [redacted] du vol précédant immédiatement l'état d'apesanteur. Les chiffres obtenus servant de référence.
2°- pendant la période d'apesanteur
3°- pendant la période terminale du vol qui fait immédiatement suite à l'apesanteur. Les chiffres obtenus servent de contrôle.

Pour chaque phase on retient les performances lors des premiers vols paraboliques et celles lors des derniers vols c'est à dire chez les animaux habitués. Les résultats sont analysés de la façon suivante : On compare entre elles les performances obtenues lors de chaque phase de vol pendant les premiers vols puis de la même façon les performances des derniers vols. Les résultats sont consignés sur les shémas ci-contre.

En apesanteur, pour les premiers vols, les animaux normaux cessent pratiquement de travailler. Par ailleurs le film montre qu'ils sont désorientés et apparaissent très souvent à l'envers dans la pièce. Il faut noter que l'espèce utilisée possède une acuité visuelle particulièrement fine et que les repères visuels demeurant inchangés pendant le vol. Dans les mêmes conditions les animaux labyrinthectomisés réalisent des performances très convenables et presque identiques à celles de la période de référence. Seul le troisième travaille nettement moins bien, mais cependant mieux que chacun des singes normaux. Aucun d'eux n'est désorienté et en particulier n'inverse sa position par rapport à la pièce.

Après I20 vols, les animaux normaux s'adaptent considérablement. En moyenne leurs performances en apesanteur sont sept fois meilleures qu'au cours des premiers vols. Il existe des



En trait plein : résultat lors des premiers vols.

En pointillé : résultat lors des derniers vols.

Figure 1 : Performances réalisées par chaque animal en apesanteur.

différences dans les facultés individuelles d'adaptation. Dans l'ensemble elle s'effectue très vite. Elle se manifeste d'abord pour l'orientation (les animaux n'inversent plus leur position) puis pour la réalisation de la tâche. Le singe L C s'améliore beaucoup plus que les autres mais les auteurs attribuent ce fait à un artefact lié aux conditions techniques. Par contre chez les animaux labyrinthectomisés les performances deviennent un peu moins bonnes que pendant les premiers vols.

Lors de la phase de contrôle qui suit la phase d'apesanteur, au cours des premiers vols les animaux labyrinthectomisés font mieux que les animaux normaux . Lors des derniers vols, les premiers améliorent un peu leurs performances, les second beaucoup plus. Cette épreuve de contrôle prouve que les déficits observés en apesanteur étaient bien liés à l'apesanteur et non pas aux accélérations qui l'ont précédée. D'ailleurs l'observation des films a donné aux auteurs la conviction que lors des accélérations il n'y avait aucune gène dans la réalisation de la tâche.

Une dernière analyse considère les résultats pour chaque groupe d'animaux. Les performances étant toujours exprimées en pourcentage, l'indice I00 coïncidant avec les performances de référence :

Lors de la phase d'apesanteur :

Chez les animaux normaux :

Au cours des premiers vols on note 11% donc un gros déficit.
Au cours des derniers vols : 78% donc excellente récupération avec l'habitude.

Chez les animaux labyrinthectomisés :

Au cours des premiers vols : 74% c'est à dire un faible déficit.
Au cours des derniers vols : 60%. Donc absence d'adaptation chez eux, au contraire une tendance à l'affaiblissement des perfermances.

Lors de la phase de contrôle :

Chez les animaux normaux :

- Premiers vols : 40%
- derniers vols : 80%

Chers les animaux labyrinthectomisés :

- premiers vols : 80%
- derniers vols : I00 %

Les films du comportement des animaux bien que plus concrets que les chiffres sont d'interprétation plus délicate.

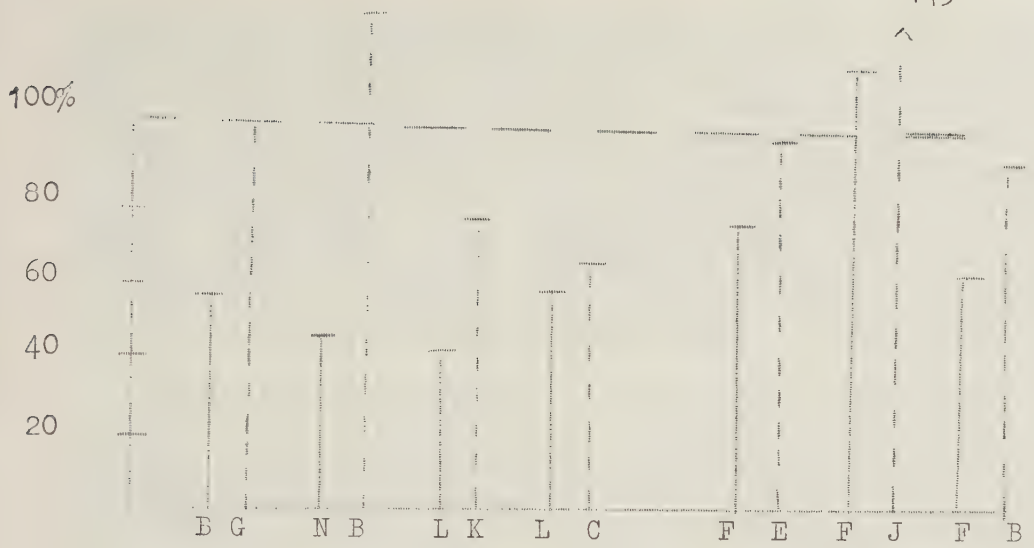
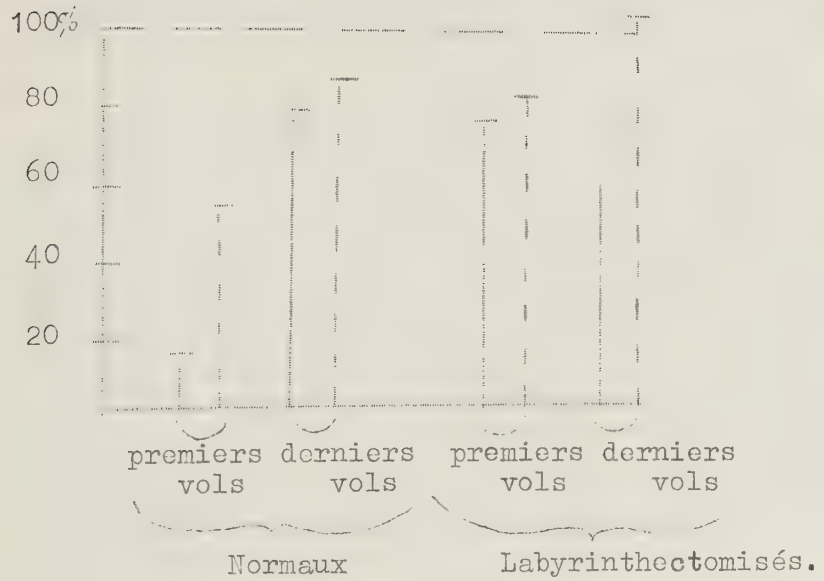


Figure 2 : Performances réalisées par chaque animal juste après l'apesanteur.



En trait plein : résultat en apesanteur.

En pointillé : résultat juste après l'apesanteur.

Figure 3 : Performances réalisées en moyenne par chaque groupe d'animaux pendant l'apesanteur et après l'apesanteur.

Les auteurs en déduisent cependant qu'à aucun moment, en apesanteur, les animaux labyrinthectomisés ne donnent l'impression de faire des progrès dans la coordination de leurs mouvements. Cela explique qu'ils ne prennent aucune habitude et en conséquence n'améliorent pas leurs performances avec la répétition des vols. La faillite est particulièrement nette chez le troisième. Les singes normaux bien que plus désorientés au début s'adaptent rapidement aux nouvelles conditions et grâce à un comportement qui tient compte de l'ambiance nouvelle ils finissent par sembler plus à l'aise que les autres.

Les animaux normaux en apesanteur sont donc au début très perturbés dans leur tâche et se désorientent. Les auteurs attribuent sans discussion ces troubles au vestibule puisque les animaux labyrinthectomisés sont peu perturbés. En outre comme il semble à peu près établi par d'autres expérimentations que l'apesanteur n'entraine pas de retentissement notable sur le fonctionnement des canaux semi-circulaires, ils présument que seul l'appareil otolithique peut être rendu responsable. De telles notions seront d'ailleurs retrouvées chez l'homme par des études du même ordre. Les animaux normaux s'adaptent très rapidement et remarquablement bien, les animaux labyrinthectomisés ne s'adaptent pas, au contraire leurs performances se dégradent quelque peu avec la répétition des vols en apesanteur. Enfin les effets de l'apesanteur ne se dissipent pas immédiatement et une réadaptation aux conditions habituelles s'avère nécessaire. Ces expériences n'expliquent pas le mécanisme des troubles observés. Il faut noter que ces conclusions coïncident avec celles d'expériences soviétiques et américaines à propos des illusions rapportées par l'homme au cours de l'apesanteur. Ces illusions purement subjectives chez l'homme prennent ici une valeur objective

OOSTERVELD et VAN DER LAARSE en 1969 ont étudié le nystagmus post-rotatoire chez le lapin. Les périodes d'apesanteur durent neuf secondes au cours de chaque vol parabolique. Dix lapins ont été testés. Ils sont soumis à une rotation peu avant l'apesanteur. Le tracé enregistré par électronystagmographie montre que le nystagmus post-rotatoire n'est pas modifié par l'apesanteur. Par contre dans des conditions d'hyperpesanteur le nystagmus post-rotatoire est diminué pendant les douze secondes qui suivent le début de l'hyperpesanteur. Après ces douze secondes le nystagmus reprend lentement sa valeur initiale. Pour une hyperpesanteur supérieure à 2g l'amplitude et la durée du nystagmus post-rotatoire diminue de 50%, 3g réduit le nystagmus de 70%. Les auteurs sont incités à penser que le nystagmus aurait totalement disparu pour une hyperpesanteur supérieure à 4 ou 5 g.

De ces observations on peut tirer un certain nombre de conclusions. L'animal labyrinthectomisé se comporte mieux en apesanteur que l'animal normal.

Les troubles observés en relation avec l'appareil vesti-

bulaire sont : désorientation avec tendance à inverser la position par rapport à l'axe vertical, incoordination motrice, troubles neurovégétatifs et peut-être altération de la vigilance.

L'activité des otolithes parait seule modifiée, celle des canaux semi-circulaires est à priori normale. Tout se passe comme si l'activité des otolithes devenait nulle en apesanteur chez l'animal au repos, cette activité semble proportionnelle au logarithme de la valeur de la pesanteur pour des valeurs de g comprises entre 0 et 1.

L'animal dès le moment où il est maintenu ou qu'il peut se maintenir est moins perturbé que s'il flotte librement.
La vision doit jouer une importance aussi grande dans l'équilibre en apesanteur que dans les conditions habituelles.

L'accoutumance semble créer chez l'animal normal une réadaptation de l'orientation et de l'équilibre, aucune accoutumance n'apparait chez l'animal labyrinthectomisé.

Après l'apesanteur, l'animal normal accoutumé ne se réadapte aux conditions habituelles qu'après une certaine latence.

Les études chez l'homme vont permettre non seulement d'analyser les impressions du sujet, mais aussi la réalisation des épreuves vestibulaires afin de mieux approcher les réactions de l'organe en apesanteur.

LES OBSERVATIONS CHEZ L'HOMME

EN DEHORS DES VOLS SPATIAUX

Il n'est pas inutile de rapporter tout d'abord quelques unes des observations qui ont été faites par les méthodes d'immersion.

L'immersion permet en effet une diminution du tonus de posture et supprime les sensations de pression et de toucher données par les points d'appui. On s'est essentiellement efforcé par cette méthode de déterminer le seuil de sensibilité des otolithes.

GARLEN en I920 en plaçant des sujets immergés sur une chaise inclinable avait mis en évidence une moindre certitude dans les jugements de position. La conscience de la position du corps et du sens de la verticale ont été ensuite utilisées par de nombreux auteurs comme tests de la sensibilité utriculaire. KNIGHT en I958, MARGARIA I958, SHOCK I958-I959, BROWN I96I.

QUIX en I928 avait mis en évidence une tache aveugle otolithique lorsque le sujet couché sur le dos laisse tomber la tête en arrière en hyperextension. Avec l'idée de simuler une apesanteur physiologique on a donc cherché à reproduire cette position en immersion. KNIGHT essaya de contrôler la valeur de cette technique de simulation. Tout en étant incapable de mettre en évidence une tache aveugle, Il nota que les sujets placés la tête en bas pouvaient subir un important déplacement angulaire sans en avoir la perception. Il en conclut que cette technique bien qu'imparfaite pouvait être utile.

SHOCK en I958 incline puis redresse progressivement ses sujets et recherche l'exactitude de leur perception de retour en position verticale. Les erreurs vont de 0 à I5 degrés et les fluctuations d'un sujet à l'autre sont importantes. Dans une autre série d'expériences, les sujets doivent amener une barre lumineuse en position verticale. Les résultats sont nettement moins bons en immersion qu'à l'état libre. De plus ils sont moins bons lorsque la tête ou le tronc sont inclinés qu'en position assise classique.

BROWN en I960 a étudié l'effet de la rotation en immersion sur l'identification de la verticale. A cinq ou six mètres de profondeur, les plus mauvaises déterminations ont lieu lorsque le sujet se trouve soit la tête en bas soit la tête inclinée en arrière. La détermination de la verticale est pourtant plus facile si les sujets peuvent remuer la tête.

MARGARIA en I953 et en I957 a étudié l'appréciation des positions statiques par rapport à la verticale. Il a constaté ainsi que la situation la moins favorable était la position tête en bas. L'amélioration semble cependant sensible avec l'entrainement. L'état d'immersion ne modifie pas ces résul-

tats . L'auteur conclut que le principal organe devant intervenir pour la perception de la verticale devrait être l'utricule mais il croit pouvoir estimer que la disparition de l'excitation des récepteurs utriculaires lors de l'apesanteur, n'entrainera pas de troubles physiologiques.

MANN en I950 passant en revue les études anciennes sur l'orientation dans l'espace notait des différences considérables dans les résultats obtenus par les différents auteurs. On peut faire la même conclusion après la revue des travaux en immersion. Celle-ci malgré son intérêt ne peut apporter de résultats certains sur l'importance et la valeur respectives qui peuvent être attribuées aux récepteurs cinesthésiques et vestibulaires (GRANDPIERRE). Il a été cependant démontré que des sujets dont le vestibule a été accidentellement détruit (destruction bilatérale) et dont on bande les yeux sont totalement incapables de s'orienter en immersion, les sujets normaux placés dans les mêmes conditions, pourvu que leur position soit proche de la verticale, sont capables de définir à peu près correctement la verticale, l'identification devient beaucoup plus fantaisiste dès que l'axe du corps excède de 20 à 30 degrés l'axe de la verticale. Une bonne contribution de l'appareil vestibulaire à l'identification de la verticale semble donc subordonnée à la position de l'appareil otolithique par rapport à l'axe de gravité.

Avant toute expérimentation GAUER et HABER en I950 avaient présagés qu'un homme en milieu d'apesanteur éprouverait une perpétuelle et désagréable sensation de chute dans le vide.

L'un des premiers à expérimenter l'apesanteur fut semble-t-il VON DINNGSHOFEN en I952. Il rapporte l'impression de flotter entre le siège et le dispositif de contention. La sensation de chute dans le vide n'est que fugace et d'autant plus probable que la variation d'accélération entre la pesanteur (ou l'hyperpesanteur) et l'apesanteur est plus brutale.

Des recherches systématiques sur les effets de l'apesanteur sur l'homme furent commencées aux U.S.A. dès I95I.

E.R. BALLINGER rapporte les impressions de YEAGER, pilote qui a effectué trente vols paraboliques réalisant à chaque fois de courtes périodes de subgravité et celles d'un sujet étendu à plat ventre et attaché sur une couchette horizontale dans le même appareil. L'un et l'autre n'ont présenté ni désorientation ni incoordination. Toutefois ils pensaient que privés de leurs moyens de contrôle visuel ou des sangles qui les fixaient au siège ou à la couchette, ils auraient eu des troubles importants. Ces impressions concordent donc avec celles de VON DIRINGSHOFEN. L'auteur en déduit que tant que le pilote se trouve fixé sur son siège et tant qu'il conserve des points de repère visuels, il maintient normalement sans efforts appréciables, son orientation.

En France des pilotes font part de sensations identiques l'un deux présente lors des premiers essais un certain vertige avec impression de rotation de l'avion autour de son axe

tranversal et insécurité et chute. Aux essais ultérieurs, il conserve le contrôle parfait des points de repère fixes et mobiles et ne note aucune incoordination pour les gestes habituels.

S.J. GERATEWOHL en I954 raconte les premières impressions de SCOTT CROSSFIELD en vol parabolique sur avion à réaction. Celui-ci éprouve d'abord une sensation d'ébriété mais non de chute qui a débuté au cours du passage de l'hyperpesanteur à l'apesanteur et qui ne disparait qu'à la cinquième parabole.

H.J.A. VON BECK en I954, parallèlement à ses expériences sur les tortues poursuivit des recherches chez l'homme. Il constate une perturbation des réflexes de posture, de la fonction proprioceptive, à l'aide d'une expérience ingénieuse. Celle-ci consiste à faire inscrire une série de croix sur un carré de papier suivant la diagonale de haut en bas et de gauche à droite. Cette inscription doit être faite les yeux bandés, en vol normal, en accélération centrifuge et en gravité nulle. Dans ce dernier cas la diagonale est rompue. A partir d'un certain moment, elle remonte à angle droit en haut et à droite. Au bout de plusieurs essais successifs cette anomalie disparait.

En I956 S.J. GERATEWOHL présente les résultats d'un travail important. Les études portent sur seize sujets âgés de 22 à 46 ans, tous pilotes mais dont l'entrainement est inégal. Chacun d'eux exécute plusieurs vols paraboliques avec chaque fois un passage de vingt à trente secondes en apesanteur. L'auteur étudie les différentes sensations subjectives ressenties. Chaque pilote doit en effet rédiger un questionnaire où il relate exclusivement les sensations, émotions, perceptions ressenties par lui les yeux ouverts puis les yeux fermés : huit pilotes éprouvèrent une sensation plutôt agréable, de bien être "l'impression étrange et plutôt agréable d'être soulagé de soutenir son propre corps" "de flotter soi-même dans un état de détente musculaire absolue" "de constater que tous les gestes sont réalisés sans aucune difficulté, sans le moindre effort physique". Trois pilotes ont une sensation de mouvement, de chute, de rotation en arrière. Sensations plutôt désagréables mais qui ne s'accompagnent pas de vertige pour deux d'entre eux. Le troisième éprouve au cours de certains vols un léger état vertigineux avec céphalées, sueurs et impression de fatigue. Cet état vertigineux est défini par une sensation de rotation de l'ensemble du corps, débutant par l'impression d'une plénitude de la tête. A aucun moment ce sujet n'eût l'impression de chute. Cinq pilotes éprouvent des vertiges accompagnés d'un cortège neuro-végétatif. Après le vol l'état nauséeux, une tendance à la somnolence persistent.

En I958 LOMONACO et SCANO font des constatations voisines chez des sujets placés dans le siège de la tour de subgravité. Dans une autre série d'expériences, ils ont enregistrés par électronystagmographie le nystagmus obtenu, après stimulation calorique du vestibule au sol, chez des sujets soumis à la tour de subgravité. Les tracés restent réguliers pendant le

lancer. Il n'y a pas de nystagmus provoqué par la subgravité, donc pas d'action sur les canaux semi-circulaires. Les auteurs en déduisent que l'absence de stimulus de l'appareil otolithique n'agit pas sur les canaux semi-circulaires.

En I958 GERATEWOHL et STALLINGS portent leurs recherches sur les illusions de déplacement de l'image résiduelle d'un point lumineux observé en milieu obscur, illusions qui apparaissent chez le sujet soumis à des variations de la force de gravité. Pendant l'accélération, l'image résiduelle semble se déplacer vers le bas. Au début de l'apesanteur elle semple se déplacer vers le haut. Si l'apesanteur se poursuit elle continue à se déplacer vers le haut puis elle reprend progressivement une position centrale.

D'autres observations ont été faites à l'Aerospace Médical Laboratory sur des sujets flottant à l'intérieur d'un avion en l'absence de pesanteur. Placés dans l'obscurité, ils ne disposaient comme point de repère, que d'un disque fixe faiblement lumineux. Au moment de l'accélération, les sujets ont l'illusion d'un mouvement du disque vers le bas, au début de l'apesanteur, le disque semble se déplacer vers le haut. D'autre part au cours de certaines expériences, les sujets ont eu l'impression que l'avion avait effectué une rotation complète sur lui-même (mouvement de tonneau) au cours de la phase d'apesanteur. Une telle impression n'apparaissait jamais s'il existait un nombre suffisant de repères visuels.

En I959 VON BECK place un pilote très expérimenté en apesanteur à son insu (ce pilote n'avait pas dormi depuis 48 Heures et s'était profondèment endormi après un repas copieux) Il le réveille pendant l'apesanteur. Les premières impressions du pilote sont que bras et jambes flottent et se détachent de lui à tel point qu'il éprouve le besoin de les attirer à lui afin de maintenir une posture normale. Il tente de se maintenir à l'habitacle. Il devient incapable de s'orienter. Jamais il n'avait ressenti une telle désorientation au cours des vols en apesanteur.

En I960 le même auteur constate que six des dix huit sujets placés en apesanteur présentent une symptomatologie associant nausées, vertiges, vomissements pendant l'apesanteur.

LOFTUS étend l'expérience à deux groupes de sujets. Dans le premier groupe de 45 personnes, 23 présentent des troubles; Dans le second groupe de 90 personnes, 2I ont des vomissements et 23 autres des nausées. Sur les 44 qui ont eu des vomissements 60% présentent une reprise des nausées dans la soirée du jour du vol.

A. GRAYBIEL en I965 tente de mieux préciser l'importance de ces troubles qui, nous le verrons, ont pu être ainsi observés chez certains cosmonautes et que l'on peut désormais regrouper sous le terme de "mal de l'espace". Pour cela il choisit un lot de sujets dépourvus de toute fonction labyrinthique (par suite de méningite pour la plupart), un lot de pilotes et un

lot de sujets inexpérimentés. Tous sont assis, maintenus par des ceintures et ont été informés des buts de l'expérience. Ils sont soumis à 40 vols au cours desquels l'apesanteur dure dix à douze secondes chaque fois. Les sujets dont le labyrinthe est détruit ne relatent aucun signe subjectif particulier, au contraire l'expérience leur procure de l'agrément. Les pilotes sont pour la plupart indemmes de tout trouble. Quelques uns pourtant bien qu'ils ne disent pas être incommodés apparaissent légèrement mal à l'aise. L'un deux relate ses impressions après les vols : "Tout de suite après, je note simplement une légère difficulté pour marcher et une tendance nauséeuse. Cela dure une heure environ. Tout va bien ensuite dans la soirée."Le pilote poursuit en ces termes la description de ses sensations.

" Mais vers 11 heures du soir, je note une difficulté pour marcher surtout quand je m'apprête à tourner. Dès que je veux faire un pas mon pied semble demeurer au sol. Une fois couché, j'ai l'impression d'être ballotté d'un côté sur l'autre ce qui est impossible puisque je me maintiens solidement cramponné au lit. Par la suite, je sors du lit et fais quelques pas afin de voir si cela allait durer. Cela cesse quelque temps pour reprendre ensuite. Je retourne me coucher. Au réveil tout va bien. A IO heures du matin cela reprend. Notamment si je me lève brusquement ou si je passe brutalement du chaud au froid ou encore de la lumière vive à l'obscurité. Vers midi cela empire surtout quand je veux m'asseoir. Cela persiste jusqu'à la nuit puis tout disparait progressivement. Avant de me coucher tout a totalement cessé. Le lendemain matin cela reprend très légèrement pour ne plus jamais réapparaitre par la suite". Chez les sujets inexpérimentés, il existe également des variations individuelles. Cependant la plupart d'entre eux sont franchement incommodés avec anxiété, pâleur, sueurs. Les troubles apparaissent chez 64% d'entre eux. L'auteur conclut que la majorité des sujets normaux non entrainés doivent s'attendre à souffrir de ces maux en apesanteur. L'entrainement diminue considérablement ce risque. Il ajoute que l'apesanteur n'est peut-être pas le facteur le plus responsable, les accélérations qui précédent et suivent, interviennent dans une large mesure. Enfin, l'homme est beaucoup plus exposé aux troubles s'il flotte librement que s'il est bien maintenu par des sangles.

En I966 E.F. MILLER et ses collaborateurs étudient l'activité des otolithes, en appréciant l'impertance de la contre-rotation des yeux à une inclinaison du corps, en gravité normale, demi-gravité et gravité nulle. Pour cela ils prennent six sujets présentant une destruction bilatérale du vestibule et de la cochlée et sept pilotes normaux, peu sensibles au mal des transports. Les sujets sont placés sur deux fauteuils se faisant vis à vis et fixés sur un socle permettant d'imprimer des inclinaisons gauche et droite de 50%, le tout étant fixé au plancher de l'avion. La contre-rotation des yeux est enregistrée par un système de caméra. L'avion exécute un vol parabolique présentant successivement, à un moment donné, une gravité nulle pendant cinq secondes, puis une période transitoire d'une seconde et enfin une demi-gravité pendant six secondes. L'expérience se déroule de la façon suivante : mesure de la contre-rotation sur un seul oeil fixant un point, l'autre étant

obturé, quatre inclinaisons successives, - 50°, + 25°, - 25°, + 50°, deux trajectoires paraboliques pour chacune de ces positions. Chez les sujets normaux l'importance de la contre rotation est normale en gravité, nettement moins marquée en demi- gravité et pratiquement nulle en apesanteur, cela quelle que soit l'importance de l'inclinaison. On ne retrouve pas une fonction linéaire entre l'activité des otolithes ainsi mesurée et la valeur de g, par contre une fonction logarithmique semblerait apparaitre. Chez les sujets dont le labyrinthe est fonctionnellement détruit, il existe aussi des différences, mais à peine marquées et surtout très inférieures aux précédentes. Les auteurs tirent les conclusions suivantes : Le test utilisé est valable. Le temps de latence de la réponse oculaire par rapport au début de la modification de l'excitation est de cinq secondes ce qui est un chiffre supérieur à la normale.

Cette anomalie peut relever des conditions expérimentales. Il semble exister une relation logarithmique entre le stimulus et la réponse otolithique dans le cas d'une pesanteur inférieure à g. L'absence de contre-rotation en apesanteur semblerait indiquer que tout se passe comme si les otolithes n'existaient pas et soient donc inutiles. Cependant de système otolithique est potentiellement disponible, il peut être utile pour identifier les forces d'inertie auxquelles le voyageur de l'espace se trouve soumis au cours de ses activités.

La même année M.M. JACKSON et C.V.SEARS ont recherché les effets de l'apesanteur sur les canaux semi-circulaires en étudiant le nystagmus. Au cours de vols paraboliques réalisant chacun une période d'apesanteur de dix secondes on utilise une chaise de Barany pour produire les accélérations angulaires et induire le nystagmus. Le sujet est solidement maintenu à la chaise, elle-mêmê est fixée au plancher de l'avion. Le nystagmus est enregistré par électronystagmographie et par cinématographie.

On enregistre les tracés avant pendant et après chaque vol. Trente volontaires participent à cette étude, ils ont été choisis parmi des sujets peu incommodés en apesanteur. La tête du sujet est maintenue de telle façon que le canal horizontal se trouve dans le plan de rotation, l'éclairage ambiant est faible. Trois essais sont pratiqués pour chaque sujet pour chacune des quatre conditions suivantes : 0 g, 1 g et 2g en vol et 1g au sol. La chaise est accélérée pour atteindre une vitesse de 273 degrés par seconde environ puis la déccélération est faite rapidement jusqu'à l'arrêt brusque. Chaque essai dure dix secondes. Il n'a pas été commode de soumettre chaque sujet exactement aux mêmes conditions. Chez vingt sujets, la stimulation du canal semi-circulaire horizontal pendant l'apesanteur engendre un nystagmus, celui-ci persiste après la rotation. L'amplitude et la fréquence de la réponse per-rotatoire sont supérieurs à ceux de la réponse post-rotatoire et pendant la courte période de transition le nystagmus n'est pas apparent (cela confirme bien que l'accélération angulaire est suivie d'une déccélération sans période de vitesse angulaire constante). On note des variations

individuelles dans les réponses. Mais pour chaque individu la réponse est la même aussi bien pendant l'apesanteur que pour 1g ou 2g. Au cours des périodes intermédiaires entre les différentes phases 1g, 0g, 2g aucun nystagmus horizontal ou vertical spontané n'est enregistré. En outre au cours d'une série d'essais en apesanteur, les sujets n'étant soumis à aucune rotation du fauteuil, aucun nystagmus n'apparait ce qui témoigne de l'absence de toute accélération angulaire qui pourrait résulter des évolutions de l'avion. Enfin la majorité des sujets testés a relaté que la sensation de rotation est plus intensèment ressentie dans l'environnement à 2g. Les auteurs concluent qu'il n'apparait pas de modification de la réflectivité des canaux semi-circulaires en apesanteur; il ne semble pas se constituer de changement dans les relations entre canaux et otolithes (en supposant que l'activité de ces derniers se trouve modifiée en apesanteur); malgré l'absence de la stimulation spécifique des otolithes : la pesanteur, le nystagmus post-rotatoire ne se modifie pas.

En 1967 KELLOG et GRAYBIEL pensent qu'en apesanteur les épreuves caloriques sont incapables d'entrainer une modification du poids spécifique de l'endolymphe. Aucun mouvement endolymphatique ne peut donc se produire. Si les données physiologiques classiques sont exactes, aucune stimulation des canaux semi-circulaires n'a lieu et par là aucun nystagmus. Ils choisissent huit pilotes. Chacun d'eux possède un labyrinthe normalement excitable par les épreuves caloriques à terre. On procède de même à l'irrigation de trente cm3 d'eau froide deux à quatre secondes avant la phase d'apesanteur de vols paraboliques. Aucun nystagmus n'est enregistré pendant l'apesanteur. Par contre, quelquefois, le nystagmus apparait sitôt achevée la phase d'apesanteur, il s'épuise ensuite normalement. Tout se passe donc comme si le nystagmus était interrompu pendant l'apesanteur. Cette observation si elle ne nous apprend rien sur la physiologie de l'appareil vestibulaire en apesanteur a le mérite de confirmer les notions classiques selon lesquelles le déplacement de la cupule des canaux est nécessaire à l'excitation.

Les mêmes auteurs, la même année publient l'observation du Lieutenant NEIDER de l'U.S.N. Celui-ci a relaté une curieuse illusion apparue au cours de certains vols paraboliques, en apesanteur, quand il flottait librement : "la notion du haut et du bas est soudain inversée, la sensation que la position verticale du corps s'est brutalement renversée et le sentiment que tout à coup l'avion vole à l'envers" Il détermina que deux facteurs essentiels additionnés étaient nécessaires pour la perception de l'illusion. Le plus important est que la tête soit plus bas située que les pieds par rapport à la cabine. L'autre est de faire face à l'avant de la cabine qui vue ainsi prend l'aspect d'un tunnel. Il établit qu'il éprouvait une désorientation uniquement dans de telles conditions. Puis les auteurs passent en revue les principales publications au sujet de ces illusions :

SIMONS ET GARDNER avaient fait part des impressions de

quelques uns de ses pilotes lorsqu'ils flottaient en apesanteur : l'un " Aussitôt que mes pieds furent au plafond, je me réorientais en situant le bas en direction du plafond". Un autre : "Maintenant, j'ai la sensation de me déplacer vers l'avant, je suis contre le plancher (il l'a touché un instant) maintenant je me trouve sens dessus dessous". Plusieurs autres rapportent des sensations voisines avec quelques variantes. Le Capitaine SIMONS écrit que bien que ce fût une expérience fréquente pour les pilotes de se réorienter soudain comme si le haut devenait le bas ils n'ont pas exprimé l'idée que l'avion venait d'effectuer un tonneau mais il ajoute que peut-être n'avaient-ils pas analysé le fond de leur impression.

KASYAN, KOLOSOV,LEBEDEV et YUROV après réexamen des expérimentations soviétiques au cours de vols paraboliques ont écrit : "Dans le cas d'un contrôle visuel de la position de l'avion dans les conditions d'apesanteur, aucune désorientation spatiale n'est observée chez les pilotes. Quand les yeux sont fermés, des illusions sur la position de l'appareil et du corps dans l'espace apparaissent. Aucun pilote n'est capable d'évaluer les évolutions qu'est en train d'effectuer l'appareil".

MILLER au cours des études que nous avons relatées a observé que les sujets avaient assez souvent l'impression d'avoir la tête en bas.

Enfin, nous le verrons, certains des premiers cosmonautes ont éprouvé au cours de vols orbitaux des illusions du même genre.

KELLOG et GRAYBIEL instruisent des hommes afin qu'ils sachent se placer dans les conditions énoncées par le lieutenant NEIDER pendant l'apesanteur. Parmi eux, certains ont des fonctions vestibulaires normales, d'autres en sont dépourvus. Tous les sujets normaux situent le bas là où se trouvent leurs pieds. Seul un sujet inexpérimenté pense que l'avion s'est retourné. Les sujets dépourvus de labyrinthe fonctionnel, dans les mêmes circonstances n'éprouvent aucune illusion. Les auteurs font ainsi remarquer qu'en apesanteur il semble que le bas soit identifié par référence aux pieds. Ils ajoutent qu'il n'est pas possible d'attribuer l'illusion ni à un g négatif puisque les sujets flottent librement ni à une poussée occasionnelle de la main ou du pied contre la carlingue du fait de la soudaineté de l'illusion. Ils ont d'ailleurs fait une contre épreuve en soumettant les mêmes sujets à un petit g négatif (hypopesanteur dirigée vers le plafond de l'appareil) Dans ce cas, les sujets dépourvus de fonction vestibulaire estiment tous qu'ils sont à l'envers dans la cabine. L'un deux dit : "pieds pendants vers le haut de façon certaine, pas de sensation d'être debout, la pression aux pieds était trop faible pour créer une quelconque sensation de posture". Un autre: "Notion d'être à l'envers, mais la force qui s'exerçait était insuffisante pour donner l'impression de poids normal". Un autre : " Il était difficile de dire si j'étais à l'envers où si c'était l'avion qui s'y trouvait, sans les repères visuels je n'aurais pu le dire" Un autre : "pendant les premières

secondes, je n'ai pas eu l'impression d'être à l'envers, il a fallu que je le constate par la vue, après cinq secondes environ je commençais à sentir le sang m'affluer à la tête et alors j'ai compris que j'étais à l'envers". Les sujets normaux interprètent leurs sensations en fonction de leur expérience. Les pilotes expérimentés, habitués aux conflits entre repères visuels et repères de gravité évoquent plus la position de l'appareil que leur propre position dans l'espace. Les sujets peu expérimentés se considèrent debout dans un avion qui vole à l'envers. Ils interprètent donc convenablement la force qui s'exerce sur eux. SIMONS, au cours d'essais en apesanteur avait fait marcher ses hommes sur le plafond grâce à des souliers magnétiques, ce qui revient à créer une hypopesanteur négative. Il a constaté lui aussi que les hommes se réorientaient tout à fait correctement dans ces conditions.

KELLOG et GRAYBIEL, au cours d'autres études enferment les sujets dans un moule en plastique. Cela afin de les placer dans quatre positions successives : droite, inclinée à 30°, 60° et 90° (en référence à la cabine). Les sujets normaux racontent qu'ils perçoivent un changement dans la position du corps à l'entrée en apesanteur : de tête en haut ils se sentent soudain tête en bas, des sensations inverses sont rapportées à la sortie de l'apesanteur. Cela quelle que soit la position du corps. Au contraire, les sujets dépourvus de fonction vestibulaire n'ont à aucun moment l'impression d'être tête en bas.

A l'appui de leurs observations et de celles qu'ils ont retrouvées dans la littérature, les auteurs constatent que des illusions sur la position du corps peuvent apparaitre en apesanteur. Elles ne frappent que les sujets dont le vestibule est fonctionnel. Ceux-ci tendent à situer le bas là ou se trouvent les pieds, la notion du haut et du bas n'est donc pas supprimée en apesanteur, une réorientation instinctive a lieu, celle-ci peut occasionner des illusions. La responsabilité est attribuée à l'appareil otolithique pour deux raisons : d'une part les sensations sont linéaires et non de rotation, d'autre part il n'y eut pratiquement jamais de changement de vitesse angulaire au cours des vols.

OOSTERVELD et VAN DER LOOSE en 1969 en même temps que les expériences menées à propos du nystagmus post-rotatoire chez le lapin ont étudié, chez l'homme, le nystagmus post-calorique. Ce dernier est induit par l'irrigation de l'oreille avec de l'eau à 20 degrès pendant 30 secondes. Il est enregistré par électro nystagmographie pendant les 45 secondes qui suivent l'irrigation. La calorisation est faite quelques secondes avant la phase d'apesanteur dont la durée est de neuf secondes, au cours de vols paraboliques. Pendant l'apesanteur le nystagmus post calorique et le vertige disparaissent totalement. Dans la période qui suit la fin du nystagmus post calorique l'hyperpesanteur fait réapparaitre le nystagmus. Chez les dix personnes examinées, le nystagmus peut être retrouvé pendant les 16 à 20 minutes qui suivent le début de la calorisation. Cela excède de loin la durée du nystagmus post calorique habituelle.

De plus la reprise du nystagmus s'accompagne d'un vertige rotatoire si la vitesse de la composante lente dépasse quatre degrés par seconde. Sans calorrisation préalable, les mêmes personnes sont exposées à des hyperpesanteurs, aucun nystagmus, aucun vertige ne surviennent. La disparition du nystagmus calorique en apesanteur est expliquée par l'interruption du courant endolymphatique. La reprise du nystagmus dans une période où il devrait avoir totalement disparu ne peut s'expliquer par les faibles différences de température de l'endolymphe qui subsistent. En effet, au bout de trois minutes SCHMATZ a été incapable de retrouver des différences de température dans l'os temporal de cadavres après calorisation de l'oreille externe. Des constatations rapportées par CAWTHORNE, JONGKEES prouvent que les différences de température ne sont pas seulement un stimulus des canaux semi-circulaires, mais aussi une cause d'irritation vasculaire et otolithique. Les auteurs, pour leur part attribuent la longue durée du phénomène à l'intervention de composantes vestibulaires centrales.

GRAYBIEL et ses collaborateurs en 1969 ont soumis des individus à des accélérations de Coriolis pendant la phase d'apesanteur de vols paraboliques. 19 sujets normaux et 3 sujets dépourvus de fonction vestibulaire sont étudiés. Ils sont assis dans un fauteuil de Barany animé d'une rotation à la fréquence de 30 rotations par minute. On leur demande d'effectuer des mouvements de la tête pour produire des accélérations de Coriolis. Aucun sujet dépourvu de vestibule fonctionnel n'est malade. A l'exception de trois d'entre eux, tous les sujets normaux sont à un degré variable incommodés : vertiges, nausées, vomissements etc... Huit sujets étaient indemnes de tout trouble au cours de vols paraboliques habituels, un seul d'entre eux se comporte aussi bien ici. Trois sujets étaient particulièrement résistants aux phénomènes de Coriolis au sol, deux d'entre eux font preuve ici de la même résistance, le troisième est peu sévèrement incommodé. Une nouvelle démonstration est ainsi faite sur le fonctionnement des canaux semi-circulaires en apesanteur. On constate aussi une très grande difficulté pour la prévision de la susceptibilité individuelle à l'égard du "mal de l'espace".

De ces observations chez l'homme nous croyons pouvoir retenir les notions suivantes :

Des manifestations pathologiques sont susceptibles de survenir en apesanteur, elles reproduisent une symptomatologie bien connue à point de départ vestibulaire : vertiges, nausées, vomissements et autres perturbations végétatives. Ils n'est jamais fait mention de la présence contemporaine d'un nystagmus spontané.

Il n'existe pas de sensation de chute perpétuelle dans le vide contrairement à toute attente.

Une désorientation spatiale peut apparaitre brusquement. Une verticale artificielle tend à être subjectivement reconstituée, le plus souvent en fonction de l'environnement immédiat mais parfois d'après les seuls repères corporels.

Les troubles ont plus de chances de se manifester chez un sujet non maintenu, flottant librement .

Une adaption à l'apesanteur se crée indéniablement.

Il est confirmé que l'appareil otolithique est le récepteur primordial sinon exclusif de la force de gravité.

Il est démontré que l'activité des canaux semi-circulaires est conservée en apesanteur et qu'ils répondent à peu près normalement aux accélérations angulaires.

La modification des interrelations habituelles entre les canaux semi-circulaires et les organes otolithiques peut expliquer en partie les perturbations. Un nouvel état d'équilibre semble se reconstituer avec l'accoutumance.

Il ne faut cependant pas perdre de vue que les phases d'apesanteur sont le plus souvent très courtes et encadrées d'accélérations qui à elles seules constituent un stimulus inhabituel.

Il est donc nécessaire de disposer de périodes d'observations plus prolongées avant d'admettre ces constatations.

LES OBSERVATIONS AU COURS DES PREMIERS VOLS SPATIAUX

Retraçons au préalable la chronologie des vols humains expérimentaux pendant les cinq premières années de l'ère spatiale.

le I2.4.I96I : YOURI GAGARINE U.R.S.S.
une révolution 1H.48 Vostok 1

le 5.5.I96I : ALAN SCHEPPARD U.S.A.
vol balistique 15'22" MERCURY

Le 2I.7.I96I : VIRGIL GRISSOM U.S.A.
vol balistique I5'37" Mercury

Le 6.8.I96I : GHERMAN TITOV U.R.S.S.
I7 révolutions 25H. I8' Vostok 2

Le 20.2.I962 : John GLENN U.S.A.
3 révolutions 4h.55' Mercury

Le 24.5.I962 : Malcolm SCOTT CARPENTER U.S.A.
3 révolutions 4h.56' Mercury

Le 11.8.I962 : Adrian NICOLAYEV U.R.S.S.
64 révolutions 94H. 22' Vostock 3

Le I2.8.I962 : PAVEL POPOVITCH U.R.S.S.
48 révolutions 70h.57 Vostok 4

Le 3.I0.I962 : Walter SCHIRRA U.S.A.
6 révolutions 9h. I3' Mercury

Le I5.5.I963 : GORDON COOPER U.S.A.
22 révolutions 34h I9' Mercury

Le I4.6.I963 : Valery BYROVSKY U.R.S.S.
8I révolutions ; II9h. 06 Vostock 5

Le I6.6.I963 : Valentina TERECHKOVA U.R.S.S.
48 révolutions , 70h.50 Vostock 6

Lé I2.I0.I964 : Vladimir KOMAROV,
Constantin FEOKTISTOV et Boris EGOROV (premier médecin de l'Espace, ORL) U.R.S.S.
I6 révolutions 24H. I7 Voskod 1.

IGOROV fait des observations ORL , il présente une crise vagotonique importante pendant le sommeil

Le I8.3.I965 : PAVEL BELYAIEV &
Alexis LEONOV U.R.S.S.
I7 révolutions 26H 2' Voskhod 2
LEONOV sort de la capsule pendant 23'4I"

Le 23.3.I965 : VIRGIL GRISSOM & JOHN YOUNG U.S.A.
3 révolutions 4h.57 Gémini 3
Etudes sur la physiologie vestibulaire

Le 3.6.I965 : JAMES A. MAC DIVIH ET EDWARD H. WHITE U.S.A.
62 révolutions 97h.59' Gémini 4
WHITE sort 2I'

Le 2I.8.I965 : GORDON COOPER & CHARLES CONRAD U.S.A.
I20 révolutions I90H.56' Gémini 5
Etude des fonctions otolithiques

Le 4.I2.I965 : Frank BORMAN & JAMES A LOWELL U.S.A.
206 révolutions 330h,35' Gémini 7
Etude de la physiologie vestibulaire et de visibilité dans l'espace.

Le I5.I2.I965 : Walter SHIRRA & THOMAS STRAFFORD U.S.A.
I7 révolutions 25h.5I' Gémini 6
premier rendez-vous spatial.

Le I3.6.I966 : Neil ARMSTRONG & David SCOTT U.S.A.
7 révolutions IOH.42' Gémini 8
Rendez-vous avec arrimage d'une fusée Agéna

Le 3.6.I966 : Thomas STAFFORD & Eugène CERNAN U.S.A.
46 révolutions 72h.2' Gémini 9
Cernan demeure 2H 09' dans l'espace Devant se déplacer à l'aide de l'A.M.U, n'y réussit pas, fatigue, sortie écourtée.

Le I8.7.I966 : John YOUNG et Michael COLLINS U.S.A.
44 révolutions 70H. 46' Gémini IO.
COLLINS sort retenu par un filin, perd son appareil photo, coupe la radio "par mégarde" etc.. fatigue.

Le I2.9.I966 : Charles CONRAD et Richard GORDON U.S.A.
45 révolutions 7I h.I7' Gémini II
GORDON sort avec filin pendant 44' Buée sur le casque, pouls à I55, sortie écourtée. Au cours d'une seconde sortie : pouls à I45, dort debout, sortie écourtée. Tournoiement du système Gémini-Agéna liées par un filin (manège spatial) créant une gravité artificielle égale au I/60.000^{e} de la pesanteur terrestre.

Le 11.11.I966 : James LOWELL ET EDWIN ALDRIN U.S.A.
59 révolutions 94h.36' Gémini I2 . ALDRIN totalise 5 heures

de sortie premier véritable travail dans l'espace facilité par des cale-pieds et un entrainement préalable en immersion. Travail difficile.

REMARQUES Certains vols ont été spécialement consacrés à l'étude du comportement de l'appareil vestibulaire. Il est également significatif que le premier Médecin de l'espace fût O.R.L. le vol le plus long (Gémini 7) a duré plus de treize jours, il a été l'un de ceux où les études, dans le domaine qui nous préoccupe, ont été les plus approfondies.

Les données sur le comportement de l'appareil vestibulaire au cours des vols spatiaux sont encore très limitées tout au moins telles qu'elles sont livrées par les services de recherches Américains ou Soviétiques. Les impressions subjectives ressenties par chaque cosmonaute sont brièvement rapportées après chaque vol. Les études objectives en ce qui concerne le sujet qui nous interesse ont été systématiques à l'occasion des vols Gémini V et Gémini VII chez les Américains et Voskhod I chez les Soviétiques.

Au cours du premier vol spatial, Y.GAGARINE ne parait pas avoir présenté de troubles.

Avant son vol, le premier astronaute Américain John GLENN avait été testé par deux épreuves. La première consistait à apprécier la qualité de son équilibre apparent en le faisant marcher sur des rails de plus en plus étroits. Dans la seconde, on avait précisé son seuil nystagmographique aux épreuves caloriques. Ces épreuves démontrèrent que l'Astronaute possédait des qualités supérieures à celles observées chez un groupe de pilotes. Au cours de son vol, John GLENN n'accusa aucune sensation vestibulaire de type neuro-végétatif, ni aucune sensation vertigineuse, même au cours des mouvements de tête exécutés brusquement. A son retour au sol, les tests vestibulaires de nouveau pratiqués ne démontrèrent aucune modification par rapport à celles faites avant le vol. Environ deux ans après le vol, GLENN a présenté brusquement chez lui des vertiges avec nausées et même vomissements. La survenue de ces symptomes a soulevé une certaine émotion et quelques uns ont prétendu que l'affection dont souffrait le cosmonaute n'était pas sans rapport avec sa mission. YIELDS a exprimé un démenti catégorique à de telles assertions à l'occasion du "premier symposium sur le rôle des organes vestibulaires dans l'exploration de l'espace". En 1965 GLENN a fait une chute dans sa baignoire et c'est à la suite de ce traumatisme que sont apparus les symptomes. Bien qu'aucune fracture du rocher n'ait été retrouvée, seul cet accident fortuit est en cause. D'ailleurs l'auteur rappelle que l'examen vestibulaire du cosmonaute était strictement normal jusque là.

Par la suite ni SHEPPARD, ni GRISSOM n'ont présenté aucun trouble en relation avec l'appareil vestibulaire aussi bien au cours et au décours du vol.

Les premiers cosmonautes Américains ont cependant relaté qu'au moment où ils se trouvaient placés en orbite après la

forte accélération qui a précédé, pendant les premières secondes d'apesanteur ils éprouvèrent la sensation intense d'avoir la tête en bas. Cette impression étant accompagnée d'une hyperhémie de l'extrémité supérieure du corps; les sensations ont disparu relativement vite après.

Par contre l'Astronaute Soviétique TITOV a accusé des troubles du sens de l'orientation à l'intérieur de sa capsule. Ces troubles lui font apparaitre son tableau de bord à l'envers. Lorsqu'il tourne la tête et regarde des objets se déplaçant rapidement, il ressent une sensation "déplaisante". Etant donné que la capsule ne subissait aucune rotation sur elle-même, il est impossible d'attribuer ces symptômes aux phénomènes de Coriolis. Les observateurs interprètent différemment ces constatations : PARINE pense que ces anomalies doivent être mises sur le compte de ce qu'il nomme l'impondérable. Pour YAZPOSKI elles seraient les conséquences des particularités individuelles de TITOV. Les physiologistes Soviétiques pensent que l'exclusion des sensations de provenance otolithique, la réduction des perceptions interessées aboutissent à une diminution du volume habituel d'influx afférents et à une perturbation du sens de l'orientation, au contraire les sensations en provenance des canaux semi-circulaires sont exacerbés et conduisent au développement d'un syndrome du "mal de l'espace".

A la suite de la série des vols Mercury, les observateurs pensent que pour des missions n'excédant pas cinq jours et chez des sujets très sélectionnés, il n'apparait pas de grandes difficultés qui puissent être raisonnablement attribuées à l'activité vestibulaire.

Les premières études précises ont été conduites au cours du vol spatial soviétique Voskhod 1. Les résultats ont été exposés par YUGANOV et ses collaborateurs. Trois pilotes ont participé à ce vol : KOMAROV, FEOKTISTOV et EGOROV. Ces pilotes possédaient un entrainement inégal dans le temps : le premier de plusieurs années, les deux autres de quelques mois seulement. L'entrainement avait consisté en plusieurs exercices alternant les uns avec les autres. Avant et après chaque exercice les réactions vestibulaires étaient observées à l'aide d'un certain nombre d'épreuves : giratoire simple, giratoire avec effet Coriolis, poursuivie jusqu'à l'apparition des signes neuro-végétatifs, mais n'excédant pas une durée de 15 Minutes; oscillations de l'ensemble du corps suivant le plan frontal durant quinze minutes. Enfin, étude à l'aide d'une excitation de type opto-cinétique. En outre les trois pilotes exécutaient régulièrement des vols de type parabolique pendant lesquels le seuil vestibulaire galvanique était relevé. Un compte rendu abrégé des réactions vestibulaires et du comportement des futurs astronautes pendant les vols d'entrainement nous est donné. KOMAROV : comportement normal. Mouvements parfaitement coordonnés. Il relate : une sensation agréable de légereté en apesanteur. Il ne se sent pas plus mal qu'avant. Capacités non altérées.

FEOKTISTOV : comportement normal. Légère entrave des mouvements. Quelque peu ému il relate : Santé, moral et facultés excellents, se sent très bien aussi après le vol.

EGOROV : Au premier vol un peu angoissé et contracté. Comportement calme au cours des vols suivants. Il relate : au premier vol, aucune impression notable, à la suite des fréquents changements d'accélération on a l'impression d'avoir effectué un travail physique assez ardu. Au second vol, les sensations furent plus faciles à analyser. Le travail semble plus facile et plus rapide, aucune illusion, impression d'euphorie. Au troisième vol : se porte bien et travaille bien.

Progressivement on observe que l'importance des différentes réactions subjectives et objectives a diminuée, affirmant de plus en plus la qualité de l'équilibre. Les résultats suivants ont été obtenus : diminution progressive de la durée des sensations subjectives et surtout leur apparition plus tardive par rapport au début de l'excitation aux épreuves giratoires avec effet Coriolis. (KOMAROV passe de la 2ème à la I2ème minute, FEOKTISTOV de la 1ère à la IOème et EGOROV de la 2ème à la 5ème); disparition progressive des sensations de déséquilibre immédiatement après l'épreuve des oscillations; disparition de la sensation rotatoire à l'excitation opto-cinétique, corrélation entre la diminution ou la disparition de ces différentes réactions et en particulier la diminution du seuil vestibulaire galvanique avec le nombre des vols. L'entrainement des pilotes a donc créé une accoutumance progressive aux différents excitants (même violents) vestibulaires. Un renforcement du potentiel de l'équilibre s'est constitué. Cependant la qualité de ces phénomènes nouveaux a été différente chez chacun des trois hommes. L'accoutumance a été complète chez KOMAROV, incomplète chez les deux autres, en particulier chez EGOROV qui a continué à présenter quelques sensations anormales durant le passage en agravité, aux cours des vols d'entrainement : persistance de certains phénomènes de type neuro-végétatif, quelques mouvements incertains.

Les temps pour recouvrir l'équilibre après rotation sont les suivants pour chaque homme avant et après l'entrainement :

- KOMAROV 5" 3"
- FEOKTISTOV IO,8" 4"
- EGOROV 7,5" 5,3"

Au cours du vol spatial, les réactions vestibulaires ont été testées. Les pilotes consignèrent tout d'abord leurs sensations subjectives. Ils réalisèrent aussi un test écrit, un test de pointage. Le seuil vestibulaire galvanique fut recherché.

Pendant toute la durée du vol, KOMAROV ne présente aucune sensation particulière. Les deux autres astronautes par contre ressentent des phénomènes du type illusion vis à vis de la position du corps : "à moitié courbé, la face tournée vers le bas", "renversée". Ces illusions existent aussi bien les yeux

		Yeux Ouverts			Yeux Fermés		
		AB	A	B	AB	A	B
FLOKTISTOV	Vol parabolique	88	42	46	81	41	40
	1ère investigation	86	49	37	75	48	27
	2ème investigation	87	51	36	87	52	35
	Après application du courant galvanique	89	52	37	82	61	21
KOMAROV	Vol parabolique	88	38	50	82	40	42
	1ère investigation	89	50	39	-	37	-
	Après application du courant galvanique	90	44	46	80	26	54
EGOROV	Vol parabolique	95	32	63	76	45	31
	1ère investigation	90	49	41	80	25	55
	2ème investigation	90	42	48	91	47	44
	3ème investigation	89	43	46	99	39	60
	Après application du courant galvanique	89	48	41	84	35	49

Résultats des tests écrits pratiqués chez les Astronautes avant et au cours du vol en Voskhod exprimés en degrés.

L'angle AB est formé par les lignes horizontale et verticale, A par les lignes horizontale et diagonale, B par la verticale et la diagonale.

D'après YUGANOV et COLL.

ouverts que les yeux fermés. Le passage de l'un à l'autre ne les modifie pas. Pour ces deux astronautes ces illusions ne sont pas désagréables et ne les empêchent pas d'exécuter leur travail, mais elles deviennent plus intenses s'ils y pensent. YUGANOV et ses collaborateurs soulignent que de telles anomalies avaient été ressenties lors des premiers vols orbitaux, mais seulement au moment du passage de l'attraction terrestre à l'apesanteur. Ici au contraire elles persistent tout au long du séjour en apesanteur jusqu'à la descente au moment des accélérations de freinage. Les auteurs estiment que ces illusions sont liées, non seulement aux effets Coriolis, mais aussi à l'effet direct de l'apesanteur. Au cours des mouvements de la tête, que ceux-ci soient exécutés lentement ou brusquement, EGOROV et FEOKTISTOV accusent des petits vertiges non accompagnés de nystagmus spontané. Enfin au bout d'une heure et demie de vol, EGOROV présente des petits signes vestibulaires de la série neuro-végétative. Ceux-ci s'accentuent progressivement jusqu'à la 70ème heure où ils sont à l'acmé. A ce moment cet astronaute dormait. Au réveil tout a disparu. FEOKTISTOV a présenté quelques phénomènes analogues, mais beaucoup plus atténués.

Le test écrit qui avait déjà été utilisé au cours des vols d'entrainement consiste à tracer dix cercles selon une ligne horizontale, puis dix cercles selon une ligne verticale et enfin dix cercles selon la bissectrice de l'angle droit ainsi formé. Ce test est réalisé les yeux ouverts puis les yeux fermés. Les résultats sont appréciés en fonction de l'angle droit et des deux angles formés par la diagonale. Les modifications observées sont très discrètes pour les trois pilotes comparées aux résultats antérieurs.

Le test de pointage lui aussi réalisé au cours des vols préalables consiste à toucher un repère situé à une longueur de bras du visage de l'astronaute, toujours les yeux ouverts puis fermés. L'amplitude de la déviation est notée. Les résultats indiquent que la précision des gestes demeure assez bien conservée puisqu'aucune déviation supérieure à 1,5cm ne fût notée par rapport au test de référence.

Enfin le seuil vestibulaire au courant galvanique donne les résultats suivants : 3,2mA pour KOMAROV, 1,9mA pour FEOKTISTOV et 1,4mA pour EGOROV. Ces seuils sont identiques à ceux relevés à terre.

Dans une autre publication, GAZENKO s'est penché plus particulièrement sur l'étude des illusions rapportées par certains cosmonautes au cours des vols. Il remarque que les illusions apparurent de façon soudaine chez certains cosmonautes tels que TITOV, POPOVITCH et de façon progressive chez FEOKTISTOV et EGOROV. Chez ces derniers l'illusion d'être à l'envers dans la cabine se manifeste aussi bien les yeux ouverts que les yeux fermés. Enfin les cosmonautes ont dit que la nature et l'intensité de l'illusion ainsi que le vertige étaient identiques aussi bien au cours du vol libre que lorsque la capsule

se trouvait stabilisée. GAZENKO ajoute qu'il est particulièrement interessant de noter qu'au moment ou les cosmonautes prennent appui avec les pieds à l'occasion d'exercices musculaires, les illusions diminuent ou même disparaissent totalement. Ce fait souligne l'importance de la sensibilité proprioceptive et du tact pour l'élaboration d'une analyse correcte de la position du corps dans l'espace, il tend aussi à montrer que les mouvements du corps et de la tête sont susceptibles, en apesanteur, d'engendrer une stimulation de l'appareil otolithique.

Les résultats observés au cours des vols Gémini V (séjour de 8 jours en apesanteur) et Gémini VII (I4 Jours) sont relatés par A. GRAYBIEL et ses collaborateurs. Des épreuves indirectes sont d'abord pratiquées : On demande aux Astronautes de maintenir une ligne lumineuse horizontale dans l'obscurité. Les épreuves sont exécutées avant et après le vol où il s'agit de maintenir l'horizontale vraie et au cours du vol où il faut maintenir l'horizontale par rapport au siège. Pendant le vol, la tête des astronautes est fixée, ils ne sont donc soumis à aucune force linéaire ou angulaire. La ligne lumineuse est manoeuvrée par une commande permettant de la faire tourner aussi bien dans le sens des aiguilles d'une montre que dans le sens inverse.

Une première série d'expériences a été conduite dans les conditions normales, au sol, chez un groupe de sujets normaux et un groupe de sujets dépourvus de vestibule fonctionnel. Chaque sujet était placé dans un fauteuil pouvant osciller vers la droite ou vers la gauche jusqu'à un angle de 90°. Chaque fois que le sujet oscillait d'un côté ou de l'autre, il devait s'efforcer de rétablir l'horizontalité de la ligne lumineuse par rapport au sol. Les résultats ont été différents chez les sujets normaux et chez les sujets dépourvus de vestibule. Pour les premiers, le maintien horizontal de la ligne était bon tant qu'ils se situaient près de laforce d'attraction verticale de la pesanteur; les anomalies sont apparues pour devenir de plus en plus marquées à mesure qu'ils se sont rapprochés de la position horizontale; à ce point, le sujet étant couché, elles ont été maxima, la ligne était oblique formant un angle de I5 à 20 degrés avec le plan horizontal vrai. Pour les sujets dépourvus de fonction vestibulaire, les variations ont été analogues mais nettement plus importantes en valeur absolue.

Les Astronautes ont été soumis à ces mêmes épreuves au sol. Leurs performances se situent dans la bonne moyenne de celles des sujets normaux.

Pour les auteurs, ces résultats tendent à prouver que les mécanismes otolithiques et extra-otolithiques sont intriqués et influencent l'orientation d'un élément extra-corporel car il est bien évident que pour la réalisation de ces épreuves interviennent des éléments sensoriels tactiles et proprioceptifs.

Pourtant ces résultats démontrent que leur exactitude est fonction : d'une part de la position sagittale du corps par

rapport à la force verticale de la pesanteur (rejoignant ainsi les observations faites en immersion), d'autre part de l'intégrité de la fonction otolithique.

Les résultats comparés des épreuves effectuées avant, pendant et après les vols Gémini sont les suivants : Aucun astronaute ne présente la moindre difficulté dans l'exécution de ce test aussi bien au sol qu'en apesanteur; ils les trouvent au contraire très simples et les effectuent rapidement. Il n'apparait pas de différence significative entre les résultats obtenus avant et après le vol et ceux au cours du vol. En outre, les tracés ne reflètent pas les différences qu'on a l'habitude d'observer entre les sujets normaux et les sujets dépourvus de labyrinthe fonctionnel. Les facultés visuelles d'orientation sont intactes en l'absence du stimulus gravitationnel et par là de fonction otolithique et semblent posséder une action encore plus prédominante sur les autres organes de l'orientation qu'au sol. Les auteurs poursuivent : les facultés d'orientation en apesanteur chez le sujet normal sont meilleures que celles d'un sujet dépourvu de vestibule au sol, elles sont meilleures aussi que celles d'un sujet normal au sol qui ne se trouve plus dans une position sagittale. Notons pourtant que l'un des quatre astronautes a présenté des erreurs d'environ 30 degrés par rapport à l'horizontale théorique. Les auteurs attribuent cette exception aux conditions techniques.

Une seconde série d'expériences a consisté en l'étude de la contre-rotation oculaire. Celle-ci a été pratiquée chez des sujets normaux au sol et chez les astronautes avant et après les vols. La contrerotation est mesurée par cinématographie pour chaque position d'inclinaison du corps. Les valeurs pour les astronautes se situent dans la moyenne de celles de 100 sujets normaux. Aucune différence significative n'est observée entre les résultats précédant le vol et ceux au décours du vol chez aucun des quatre astronautes. Il n'apparait donc aucune modification de la sensibilité otolithique suffisamment durable pour être enregistrée quelques heures après le retour sur terre.

Au cours du vol Gémini VII, l'Electroencéphalogramme de F. BORMAN a été enregistré pendant toute la durée de la mission. Le tracé montre une augmentation des rythmes thêta au début qui diminue ensuite progressivement pendant les heures suivantes. Il semblerait que cette modification soit la conséquence du passage en apesanteur. Elle traduirait une modification du comportement face aux conditions nouvelles de vie, notamment pour l'orientation. Pendant les heures suivantes, il n'apparait aucune anomalie de l'activité électrique corticale aussi bien pendant les états de veille et de sommeil qui pourrait être attribuée à l'apesanteur. Les études du même ordre pratiquées chez les cosmonautes russes (NIKOLAYEV, POPOVITCH, BYLOVSKY et TERESHKOVA) ont donné des résultats sensiblement voisins. ADEY et ses collaborateurs pensent à ce sujet que la diminution des incitations d'origine vestibulaires entre autres, sont susceptibles de réduire les informations sensorielles normalement utilisées face à des stimuli d'alerte

pour l'orientation.

Il n'a pas été publié d'autres études objectives par la suite. Au cours des premières sorties dans l'espace, des phénomènes subjectifs d'étiologie vestibulaire semblent beaucoup plus nets.

WHITE, le premier marcheur de l'espace Américain, trouve sa sortie plus "excitante" qu'épuisante mais il n'a aucun travail à fournir et bien que privé du fonctionnement des otolithes et des corpuscules de Meissner, il dispose de toutes ses facultés visuelles.

En septembre 1966, Richard GORDON, à demi aveuglé par sa transpiration, respirant difficilement, présente une forte tachycardie. Il doit interrompre sa sortie dans l'espace. Il présente en outre des troubles qui ne peuvent s'expliquer par les seuls défauts du conditionnement de son scaphandre; en effet GORDON peut à peine différencier le bas du haut.

Au cours de Gémini VIII en mars 1968, un rendez-vous spatial venait d'avoir lieu. Une fois les capsules arrimées ensemble, le système fût soudain animé d'un mouvement de rotation accéléré qui n'était pas prévu. Les cabines furent aussitôt détachées pour interrompre ce phénomène. En effet, le comportement des astronautes devenait dangereusement perturbé. En dépit de tous leurs efforts, les hommes étaient incapables de maintenir leur équilibre. Outre la désorientation, des nausées, des vertiges sont apparus. Pour les observateurs la conjonction des phénomènes de Coriolis, d'une réaction de panique, de troubles de la vision sont responsables d'une dissociation entre les informations visuelles et les informations vestibulaires, les troubles observés peuvent être attribués à cette dissociation.

Les premiers compte-rendus des missions Apollo au cours desquelles les astronautes sont restés plusieurs jours en apesanteur indiquent : Une impression de plénitude de la tête est ressentie au début de l'apesanteur, mais l'adaptation est très rapide. L'activité à l'intérieur du véhicule est d'un intérêt particulier. Les Astronautes ont en effet toute liberté pour se déplacer à leur guise. Ils ne se privent donc pas de tourner, de rouler, de s'étendre à l'intérieur du véhicule et ainsi de "jouer" avec l'apesanteur. Pendant le premier jour du vol, les trois astronautes éprouvent des nausées et un malaise épigastrique. Aucune sensation anormale, n'est rapportée par la suite (C.A. BERRY).

A partir des indications, encore assez substantielles, que nous fournissent ces compte-rendus des premiers vols spatiaux on peut retenir :

- Il existe un mal de l'espace, le premier cosmonaute à en souffrir fut TITOV. Le mal présente tous les caractères pathologiques habituellement attribués à un dysfonctionnement de l'appareil vestibulaire. Il ne représente pas un obstacle majeur à la vie dans l'espace. Il frappe plus ou moins certains individus et avec d'autant plus d'acuité que le sujet est moins préparé. Il est d'apparition plus probable chez un sujet évoluant dans l'espace et dépourvu des repères visuels auxquels il s'était habitué.

- Une diminution latente de l'équilibre existe tout au long du séjour en état d'apesanteur, elle peut devenir patente à tout moment, elle est ressentie par l'homme sans pour autant modifier son comportement tant que les fonctions qui assurent l'équilibre hormis la fonction vestibulaire, demeurent parfaitement disponibles.

- Il n'est pas possible de déceler chez l'astronaute de retour à terre une altération par les épreuves vestibulaires usuelles. Les canaux semi-circulaires ainsi que l'appareil otolithique possèdent des capacités inchangées après le vol.

- Les quelques tests spécifiquement vestibulaires qui ont été pratiqués au cours du séjour en agravité ne mettent en évidence aucune anomalie dans le fonctionnement des canaux semi-circulaires;

- Les renseignements sont encore très insuffisants et laissent peser plusieurs inconnues quant au fonctionnement des organes du vestibule en agravité. Nous ignorons tout sur les effets d'un séjour très prolongé dans cette nouvelle ambiance. Cela explique peut-être les recherches récentes dans le but de reconstituer une gravité artificielle par l'utilisation de stations tournantes;

APPAREIL VESTIBULAIRE ET STATIONS ORBITALES TOURNANTES

Si l'orientation spatiale en elle-même reste possible en apesanteur, la mise en rotation de la cabine spatiale fait apparaitre des difficultés (Money) une gravité artificielle de 0,2g permet à un homme de marcher sans aide mais même avec un rayon de I2 Mètres, la rotation nécessaire de 4 tours par minute pour produire cette gravité artificielle crée des difficultés de déplacement et une instabilité du corps pendant la marche qui vont exposer le cosmonaute à se heurter involontairement. Un autre phénomène lié à la mise en rotation de la cabine est la survenue, au cours des mouvements de la tête, des phénomènes de Coriolis et de ses conséquences; parmi celles-ci les mouvements oculaires vont à leur tour altérer la fonction visuelle. Il est donc très heureux que l'homme puisse vivre sans grand dommage en état d'apesanteur sinon il eut été difficile de créer au cours des voyages spatiaux, une gravité artificielle par rotation du vaisseau, les inconvénients qui apparaissent alors semblant difficilement surmontables.

Mise à part la physio-pathologie vestibulaire, un séjour prolongé en apesanteur peut avoir des retentissements graves sur certaines fonctions de l'organisme. Aussi s'est-on efforcé depuis quelques années, en dépit des obstacles, à priori insurmontables, de mesurer les possibilités humaines dans une station tournante.

Les facultés d'adaptation de l'appareil vestibulaire sont bien connues notamment face à des variations incessantes d'accélérations de grande intensité. Cela est démontré par les tests très sévères auxquels sont soumis les cosmonautes avant d'accomplir leur mission. On a donc placé des hommes dans des pièces tournantes. Au bout de un à cinq jours selon les individus, une adaptation se crée pour une vitesse de rotation de un à dix tours par minute.

GRAYBIEL et GUEDRY ont observé des sujets demeurés plusieurs semaines dans une pièce tournante. Peu après le début de l'expérience, chaque mouvement de la tête induit une sensation inhabituelle. Par exemple: le déplacement de la tête en avant entraine une fausse sensation de rotation de la tête sur le côté, un nystagmus situé dans un plan perpendiculaire au mouvement de la tête. Des symptômes végétatifs s'en suivent chez certains sujets. Cependant au bout de plusieurs jours les signes subjectifs et objectifs s'amendent, Par contre les sujets remis aussitôt dans une ambiance normale doivent se réhabituer à cette nouvelle situation. Des expériences voisines chez le chat aboutissent aux mêmes constatations.

GRAYBIEL ET WOOD ont démontré très récemment que l'adaptation peut être rapidement accélérée si le sujet contrôle les mouvements de la tête et par un choix adéquat de la vi-

tesse de rotation.

Une nouvelle preuve est ainsi faite des facultés d'habituation considérables de l'appareil vestibulaire. Il n'est donc pas impossible que les futurs cosmonautes vivront dans un état de gravité artificielle. Dans cette hypothèse, la vie en apesanteur n'aura été qu'une expérience transitoire dans l'histoire de l'humanité.

C O N C L U S I O N S

Un nouveau milieu biologique, dépourvu de l'influence de la force de gravité vient de surgir.

L'appareil vestibulaire, organe sensoriel de l'oreille interne, présente une individualité anatomique évidente : les plages de tissu différencié à vocation sensorielle y présentent une structure très voisine, seule leur disposition diffère et cela laisse présager des fonctions proches mais néanmoins différentes.

La physiologie des organes vestibulaires est loin d'être totalement éludée. Deux attributions essentielles leur semblent cependant dévolues : D'une part l'évaluation des accélérations angulaires et d'autre part celle des accélérations linéaires dont la pesanteur. Le premier rôle semble plus spécialement assumé par les canaux semi-circulaires, le second par les otolithes. Lacinétique de l'homme ou de ses supports sollicite à tout moment ces organes. La force de gravité et ses variations éventuelles sont enregistrées en permanence. Autant les connexions du labyrinthe vestibulaire l'autorisent à manifester violemment son intolérance aux stimuli excessifs ou inhabituels, autant ses facultés d'habituation apparaissent bonnes et rapides.

Parmi les nombreuses techniques d'exploration de l'appareil vestibulaire, la plupart renseignent sur son fonctionnement global; elles exigent le plus souvent la présence d'un examinateur compétent et l'utilisation de techniques rigoureuses, toutes conditions difficiles à réunir hors du laboratoire ou de la salle d'examen.

Chez l'aviateur, la force de référence de la pesanteur peut se trouver modifiée en intensité et en direction. Des manifestations pathologiques de lasérie vestibulaire, des illusions d'orientation, des troubles de l'équilibre peuvent survenir. Les conflits entre les informations issues des différentes fonctions de l'équilibre semblent en grande partie responsables.

Une accoutumance à ces conflits se développe progressivement. Aucun trouble de l'appareil vestibulaire, subjectif ou objectif ne persiste après le vol.

Les premières observations du comportement de l'appareil vestibulaire en apesanteur ont été faites au cours de très brèves périodes encadrées de fortes accélérations, par la technique du vol aérien parabolique. L'avénement des vols spatiaux a permis de prolonger l'observation sur plusieurs jours.

Ces observations aussi bien chez l'animal que chez

l'homme nous les avons rapportées dans le but d'établir une ébauche de la fonction vestibulaire en agravité. Leur analyse nous suggère aussi la possibilité de mieux préciser certaines notions de physiologie. C'est ainsi que les canaux semi-circulaires apparaissent bien être avant tout des "accéléromètres angulaires" et les organes otolithiques des "gravitomètres".

En effet l'apesanteur ne modifie pas de façon mesurable l'activité des premiers : chez l'animal comme chez l'homme le nystagmus post rotatoire demeure inchangé; elle entraine par contre une baisse de l'activité des seconds : la contre rotation occulaire, les potentiels d'action enregistrés sur les fibres otolithiques deviennent pratiquement nuls. L'existence d'un courant endolymphatique et donc d'une variation de la position de la cupule est bien l'excitant mécanique puisque les épreuves caloriques devenues incapables d'engendrer ce courant en apesanteur sont sans effet. Les courants d'action qu'on enregistre au repos sur le nerf vestibulaire sont bien d'origine gravitationnelle puisqu'ils disparaissent en agravité. En ce qui concerne les interactions entre les canaux semi-circulaires et les otolithes, aucun renseignement complémentaire ne nous est fourni mais on serait tenté de dire que leur importance a peut être été surestimée.

Les conséquences de l'agravité sur l'appareil vestibulaire semblent dominées par :

Le "mal de l'espace" qui regroupe les manifestations subjectives et objectives d'un dys fonctionnement vestibulaire et associe des vertiges, des nausées, des vomissements, des sueurs et autres perturbations végétatives. Il n'est jamais fait mention de nystagmus spontané.

Des illusions sur l'orientation.
Par contre absence de sensation de chute perpétuelle dans le vide, équilibre bien conservé dans l'ensemble, absence de tout retentissement chez le sujet de retour en pesanteur normale.

Dès 1959 VON DIRINGSHOFEN énonçait :
"la nature et l'intensité des troubles observés sont fonction : de la sensibilité individuelle, de l'habitude, de l'importance et la rapidité de la transition entre l'état précédent de pesanteur et les états de sous pesanteur ou d'apesanteur, de la constance plus ou moins durable de ces états. Pendant les états de flottement sans pesanteur, les mouvements de la tête favorisent l'apparition de vertiges intenses. Au cours des états prolongés d'apesanteur, il faut s'attendre à une lassitude physique et psychique croissante accompagnée d'une diminution de l'adaptation aux accélérations ultérieures, ce dernier phénomène pourra être combattu grâce à une gymnastique appropriée".

JOHNSON pense que l'apesanteur n'est pas seule en cause dans la survenue des phénomènes pathologiques observés.

GERATEWOHL, médecin spécialiste des vols spatiaux a écrit: "les troubles des fonctions végétatives semblent relativement peu importants si l'on excepte ceux dus aux réflexes labyrinthiques. Ces troubles surviennent au repos mais surtout lors du mouvement. Il existe de nombreuses variations individuelles".

Pour GRAYBIEL "les troubles observés sont fonction de la sensibilité individuelle, de l'adaptation acquise au cours de séjours antérieurs en apesanteur. Si l'apesanteur est un facteur dans l'apparition du mal de l'espace, il n'est pas le facteur le plus important".

Nous retiendrons pour notre part :

- Le rôle de la susceptibilité individuelle.

- La plus grande fréquence des troubles chez le sujet flottant librement que chez le sujet fixé par des sangles.

- La survenue brusque des troubles, sans cause évidente.

- L'accoutumance rapide qui se crée.

Il est incontestable qu'on ne peut attribuer au seul appareil vestibulaire la responsabilité de ces manifestations; en état d'apesanteur, les autres fonctions de l'équilibre et plus encore, les relations habituelles entre ces fonctions se trouvent modifiées.

En état d'apesanteur et au repos, les otolithes ne semblent plus fonctionner, on serait tenté d'en déduire qu'ils sont devenus inutiles, pourtant ils demeurent disponibles pour l'appréciation d'accélérations linéaires autres que la gravité, accélérations qui apparaissent au cours des déplacements dus à l'activité du cosmonaute.

Les canaux semi-circulaires paraissent fonctionner tout à fait normalement, la preuve en est qu'ils continuent de répondre aux épreuves rotatoires et aux accélérations de Coriolis.

Le séjour en apesanteur pendant plus d'une semaine ne paraît pas laisser d'empreinte sur l'activité de l'appareil vestibulaire au retour dans les conditions de vie habituelles.

Que se passerait-il pour des séjours plus prolongés pendant plusieurs mois ou années ?

On sait que l'interruption prolongée d'une fonction sensorielle entraine pour y pallier, la conjonction des efforts de plusieurs autres; on sait aussi que la fonction ne peut être ensuite recouvrée dans sa plénitude qu'au bout d'un certain temps de réadaptation. Un sujet demeuré plusieurs semaines à l'obscurité totale est incapable de retrouver toutes

ses facultés visuelles sitôt de retour à la lumière. Il en serait donc probablement de même pour l'organe otolithique encore que ce dernier, même en état d'apesanteur, continue d'être mis en jeu au cours des déplacements.

Comment expliquer le mécanisme des troubles à point de départ vestibulaire observés en apesanteur ? Les incertitudes qui pèsent sur la physiologie vestibulaire, la mince expérience sur la vie en apesanteur nous obligent à ne formuler que des hypothèses : modification du contrôle réciproque entre les canaux semi-circulaires et les otolithes aboutissant à un déséquilibre transitoire entre les deux organes, un nouvel équilibre s'établissant par la suite ? Encore faudrait-il démontrer la réalité d'un contrôle réciproque. Conflit entre les informations d'origine vestibulaire et celles d'origine visuelle ? On peut en effet penser que dans les conditions normales, au repos, le message codé d'origine vestibulaire coïncide avec le message codé d'origine visuelle pour signifier l'absence de tout déplacement; en apesanteur, au repos le message d'origine visuelle reste le même, celui d'origine vestibulaire est modifié. Il y a là source de conflit. La brusquerie des symptômes, des illusions, des impressions étranges pourrrait être fonction de la prééminence variable de l'une ou l'autre de ces informations contradictoires captées par les centres. Un tel conflit est souvent évoqué dans la génèse du mal des transports.

L'absence de pesanteur ne retentit pas uniquement sur les fonctions de l'équilibre, il n'est donc nullement exclu que les modifications de telle ou telle ou de plusieurs autres n'interviennent par contre coup sur la fonction vestibulaire. Nous gardons présent à l'esprit que l'organisme est un tout indivisible.

Dans notre domaine, nous conclurons que l'absence de pesanteur ne semble pas constituer une ambiance inacceptable ou très dommageable pour l'appareil vestibulaire, chez le sujet normal, pourvu d'une sensibilité vestibulaire modérée et ayant reçu un entrainement préalable suffisant.

Vu le Président de Thèse :

Professeur A U B R Y

Vu le Doyen Honoraire

Administrateur Provisoire
de la Faculté de Médecine :

Professeur B R O U E T

Vu et Permis d'Imprimer :

Le Recteur de l'Académie de PARIS

M A L L E T

B I B L I O G R A P H I E

- ADEY W.R. KADO R.T. and WALTER D.O. : Computer analysis of EEG data from Gémini flight. G T 7. Acro-Médic. Avr. I967 38. p.345.

- ARSLAN M. : Physiologie de l'appareil vestibulaire Encycl Médic; Chr. O R L .

- AUBRY M. et PIALOUX P. : Examen vestibulaire Encycl. Médic. Chir. O R L .

- : Progrès en O R L Edit. Flammarion.

- BARBER H. et JOHNSON W : Observations on simultaneous biplane rotation as a vestibular stimulus ; The Coriolis effect. A. preliminary report.laryngoscope (St Louis) I965.t 75 N° 6 p.879.

- BENSON A.J. and BODIN M.A. : Interaction of linéar and angular accélérations on vestibular réceptors in Man. Acro. Médic. Fev. I966 Vol 37 N° 2 p.I44.

- Effect of orientation to the gravitational vertical on nystagmus following rotation about a horizontal axis. Acta.oto. laryng. (Stockholm) I966. 6I. p.5I7

- Comparison of the effect of the direction of the gravitational accélération on post-rotational responses in yaw, pitsch and roll. Acro. Médic. I966. 37. 9. p.889?

- BENSON A.J. GOORNEY B. and Reason J.T. The effect of instructions upon post rotational sensations and nystagmus. Acta. oto. laryng. (stock) I966 t.62. p.442.

- BENSON A.J. and WITESIDE T.C. The effect of linear accélérations on the response to angular acceleration in Man. J. Physio. I96I p.I56.

- BERGER M. Système neuro-végétatif et oreille interne. Rev. laryng. I962 t.83 n° 8-I0 pp. 925-946.

- BERGSTEDT M. : Studies of positional nystagmus in the human centrifuge . Acta. oto . laryng (Stockh.) I96I suppl. I65. 1. p.I44.

- The effect of gravitational force on the vestibular caloric test. Acta. oto.laryng. (Stockl) I962 3. p.55I.

- Vestibular problems in space travel. Acta. oto-laryng. (Stockh) I967 suppl. 224. pp.72-76.

- BERRY C.A. : PRELIMINARY clinical report of the médical aspects of Apollos VII and VIII Aero-Médic. Mars I969. 40 N° 3

- BRANDT U. : Vestibular réactions during preorbital flight Acta. oto. laryng. (Stockh.). Fev. I96I. 53. N° 1 pp. 80-87.

- BROWN J.H. : Interacting vestibular stimuli and nystagmic habituation. Acta. oto. laryng. (Stockh.) oct.I966. tome 62.

- BRUNMER H.J. : Labyrinth in Aviation. Journal Amer.Med. Ass. I943 I4.p.I32.

- BURGEAT M. Gilbert A.P. et COLL. : Résultats expérimentaux concernant l'étude électro-physiologique de l'appareil vestibulaire au cours d'agressions acoustiques et cinétiques chez l'animal : leurs incidences aéronautiques et aéro spatiales. Rev. corps de santé des armées. I966. 7.N°5 lère partie pp.708.709; 2ème partie pp.720.

- CAMPBELL P.A. Problem of weight lessness. Laryngoscope Sept. I96I. 7I. N° 9 pp. I028-I033.

- CAPORALE R. l'apparato vestibulare nel volo atmosférico e spaziale. Minerva. Med. I965. t.56 N° 47 pp.2085-2II6.

- CHATELIER G. GINET J. & GRANDPIERRE R. Manifestations corticales lors de l'absence de pesanteur. J.de physiol. I965 t.57 N° 5. p.586.

- CHATELIER G. et BUSER P. : Étude neuro-physiologique effectuée sur un chat lors d'un vol en fusée. J.de Physiol. I965. t.57 p787.

- CHINN H. and SMITH P. : Motion sickness. Pharmacol. rev. I955. 7. p.33.

CLARK B. and GRAYBIEL A. Perception of the postural vertical following prolonged bodily tilt in normals and subjects with labyrinthine defects. Acta. oto. laryng. (Stockh.)I964. 58 pp.I43-I48

- HUMAN performance during adaptation to stress in the Pensacola slow rotation room. Acro. Medic. I96I.32.p.93

- CLARK B. and STERVART J.D. : Perception of angular acceleration about the yaw axis of a flight simulator. Thresholds and reaction latency for rescarch pilots Acro. Medic. I962 p. I426.

- COLENBRANDER A. Guantitative analysis of the relation between gravity headposition and ocular torsion soith regard to the otolith function. Pract. oto rhinolaryngo (Basel) I965 t.27 N° 5 p.3ll.

- COLLINS W.E. : Repeated caloric stimulation of the human labyrinth and the question of vestibular habituation. Symoo. on the sole of the vestibular organs in the exploration of

space. US Naval School of Av. Medecine. Mensacola. Fla. 20 au 22 Janv. I965 . p.I4I.

- COLLINS W.E. and GUEDRY F.E. : A rousal effects and nystagmus during prolonged constane angular acceleratio. Acta oto. laryng. I962 54. p.349.

- COMPTON G. : Symposium on possible uses of earth satellites for life. Sciences Exp. I958.

- CORREIA M.J. and GUEDRY F.E. : Modification of vestibular responses as a fonction of sate of rotation about an earth horizontal axis. Acta. oto.laryng. (Stockh) Oct. I966 tome 62.

- CRETEY J. : la vie en agravité. Thèse Med.Paris I960.

- DE VRIES H.L. The mechanies of the labyrinth otolith Acta. oto.laryng (stockh) I950 38.p.262.

- DE WITT G. : Seasickness (motion sichness) A labyrinthololegrial study. Acta. oto. laryng. (Stockh) I953 suppl.I08 1.

- DIX M.R. and HALLPIKE C.S. : The pathology, symptomatology and diagnosis of certain common disorders of the vestibular system. Proc. Roy. Soc. Med. I952. 45. p.34I.

DOWD P.J. : Résistance to motion sickness through repeated exposure to Coriolis stimulation. Aero.Medic.I965 N°. 36 p.452.

- DOWD P.J. and CRAMER R.L. : Habituation transference in Coriolis acceleration. Acro. Medic. I967 n° 38 p.II03.

EYRIES Ch. et PERLÈS B. : Embryologie de l'oreille. Ency. Médic. Chir. ORL.

- FERNANDEZ C. et LINDSAY J. : The vestibular Coriolis reaction. Arch. oto-laring. oct. I964 t.80 N° 4 pp.469-472.

- FERNANDEZ C. and VALENTINUZZI M. : Nystagmic Coriolis reaction in the cat. Acta. Oto.laryng. (Stockh.) I968 65 pp.I86-I99.

- FIELDS W.S. : Clinical problems associated with prolonged exposure to weight lessness. Sympo. on the role of the vestibular organs in space. U.S. Naval Sckool of Av.Médic. Pensacola Fla. 20-22 Janv. I965 p.203.

- FRASER A.M. and MANNING G.W. Effect of variation in swing radius and arc of incidence of swing rickness. Jour. Appl. Physio. I950. 2. P.580

- FRIEDMANN G. : GRIENTIERUNG im Raume bei peripheren und zentralen Storüngen des vestibulären Systemes Med. et Hyg. (Genève) I968 26 843. p. II97.

- FONTELLE P. : Aperçu sur la Physiologie de l'équilibre chez l'aviateur Thèse Med. Paris I964.

- FUREY J.A. and KRAUS R.N. : Adventures in Space. Am. Acad. Ophtal and Otolaryng. Chicago oct. I960.

- GASTON J. et GRIBENSKI A. : Influence de la vision sur le seuil des réactions vestibulaires post-rotatoires chez la grenouille. J.Physio. (Paris) I965 t.57 N° 5 p.582.

- GERATEVOHL S.J. : Comparative studies on animals and humain subjects in the gravity free-state J. Av.Medi. I954 25.p.4I2.

- Personal experiences durinez short periods of weight lessness reported by sixteen subjects. Communic. 7ème Congrès international d'Astronautique . Rome Sept. I956.

- GERATERWOHL S.J. and Stallings H.D. : le réflexe labyrinthique de posture (réflexe de redressement) chez le chat au cours de l'état sans pesanteur. J. Av.Med.Vol.28 N° 4 Aout I957.

- GILLINGHAM K. : Training the vestibule for aerospace opérations using Coriolis effect to assess rotation. Aero-Médic. Janv. I966. Vol 37 N° I p.47

- GRANDPIERRE R. et ROZIER J. : Système vestibulaire et vols spatiaux. Med. et Hyg. (Genève) oct. I967 25. N° 796 pp.I049-I050.

- GRANDPIERRE R. et VIOLETTE F. : Problèmes physiologiques liés à la dynamique du vol spatial J.de Physio. (Paris) I962 t. 54. pp. 11-68.

- GRAY R.F. : Functional relation ships between semicircular canal function and otolith function. Aero.médic.I960 3I. p.4I3

- GRAYBIEL A. : Functionnal disturbances of vestibular origin of signifiance in space flight.Second. Sympo. on problems of man in space. I4-I8 Juin I965 Paris.

- The importance of the otolith organs in man based upon a specific test for utricular function. Annals of oto-rhino an laryng. I956. 65 p.470

- GRAYBIEL A. CLARK B. and ZARRIELLO J.J. : Observations on human subjects living in a "slow rotation room" for périods of two days. Arch. Neuro. I960 3.55

- GRAYBIEL A. and FREGLY A. : A new quantitative ataxia test battery. Sympo. on the role of the vestibular organs in the exploration of space. U.S. Naval School of Af. Médecine Pensacola Fla. 20-22 Janv. I965 p.I2I

- GRAYBIEL A., GUEDRY F, JOHNSON W. and KENNEDY R. : Adaptation to bizarre stimulation of the semecircular canals as indicated by the omlogyral illusion, Aero. Medic. Avr.I96I 32. p.32I.

- GRAYBIEL A. and JOHNSON W. A comparison of the symptomatology expérienced by healthy persons with loss of labyrinthine function when exposed to unusal patterns of centripétal force ón a counter rotating room. Ann. Otob.I953.72 pp.357-373.

- GRAYBIEL A. and KELLOGG R.S. : Inversion illusion in parabolic flight : its probable dépendance on otolith function. Aero.Medic. Nov. I967 t.58 p.I099.

- GRAYBIEL A. KENNEDY R.S. and KELLOGG R.S. : Vestibular (canal) sickness precipitated in the weightless phase of zero-G parabolas by Coriolis force. Aero. Medic. Aout I969. Vol 40 N° 8 p.8I9.

- GRAYBIEL A., KENNEDY R.S. , KNOBLOCK F.C. and all. : The effects of exposure to a rotating environment (I0 r.p.m.) on four aviators for a period of twelve days. Aero. Med.I965 36. p.733.

- GRAYBIEL A., MILLER E.F., BILLINGHAM J. and all : Vestibular experiments on Gemini flights V and VII. Aero.Medic. Avr. I967. 38. p.360.

- GRAYBIEL A. , THOMSON A.B. , DEANE F.R. and all : Transfer of habituation of motion rickness on change in body position between vertical and horizontal in a rotating environment. Aero. Medic. Sept. I968 Vol 39. p.950.

- GRAYBIEL A. and WOOD C.D. : Rapid vestibular adaptation in a rotating environment by means of head movements. Aero. Medic. Juin I969. Vol 40 N° 6. p.638.

- GROSE V.L. : Deleterions effect on astronaut capability of vestibulo ocular disturbance during space craft roll acceleration. Aero. Medic. Nov. I967 38. p.II38.

- GUALTICROTTI T. and ALLTUCKER D.S. : Prolonged recording from single vestibular units in the frog during plane and space flight, its signifiance and technique. Aero. Medic. Mai I967. 38 . p.5I3.

- GUEDRY F. : Orientation of the rotation axis relative to gravity, its influence on nystagmus and the sensation of rotation. Acta. oto.larynG. (Stockh) I965.60. p.30.

- Some vestibular problems related to orientation in space. Acta. oto.laryng. (Stockh) I968 65. 1-2 pp.I74-I85 .

- GUEDRY F.E. and GRAYBIEL A. : Compensatory nystagmus conditioned during adaptation to living in a rotating room. Jour. Appl. Physio. Mai I962 I7. pp.398-404.

- GUEDRY F.E. , KENNEDY R.S., HARRIS C.S. and GRAYBIEL A.; Human performance during trov weeks on a room rotating at 3 s.p.m.. Aero. Medic. I964. 35. p.I70I.

- GUEDRY F.E. and MONTAGUE E.K. : Guantitative evaluation of the vestibular Coriolis reaction. Aero.Medic. I96I-32.p.500

- GUERRIER Y. : Anatomie de l'oreille interne. Encycl. Med. Chir. ORL.

- GUIOT G. et LE BESNERAIS Y. : Voies nerveuses cochlio-vestibulaires. Encycl. Médic. Chir. ORL.

- HABER H. and HABER F. : Possible methods of producing the gravity free state for medical rescarch J. Av. Med.I950 2I. p.395.

- HABER H. and GERATERWOHL S.J. : On the physics and psychophysics of weight lessness. J. Av. Med. I95I. 22 p.I80

- HENRY J.P. , BALLENGER E.R. , MAHER P.J. and SIMONS D.G. : Animal studies of the subgravity state during roket flight J. Aviat. Medic. I952 23. p.42I.

- HENRICKSON N.G. , KOHUT R. and FERNANDEZ : Studies on habituation of vestibular reflexes. Effect of caloric test Acta oto laryng. (Stockh). I96I 53. pp.334.349

- HUGUENIN S. : Influence des otolithes sur le nystagmus diencéphalique chez l'animal. Med. et Hgg. (Genève) I968.26 843. p.II99.

- JACKSON M.M. and Sears C.W. : Effect of. weight lessness upon the normal nystagmic reaction. Aero. Medic.Juill. I966. 37 N° 7. pp.7I9-72I.

- JANEKEE J.B. and JONGKEES L.B.W. : Barbecue rotation on combination with simusoïdal rotation about a vertical axis. Acta, oto-laryng. (Stockh) I968. 65 pp.244-250.

- JOHNSON W.H. : Head movement measurements on relation to spatial desorientation and vestibular stimulation. Jour. Av. Med. I956 27.p.I48.

- : Conférence on vertigo. Jour.Laring.and Otol. Oct.I963. 77. pp.830-83I.

- : Some vestibular problems in space fligth Ann. of Otol. rhin.laryng. Sept.I96I. 70 N° 3 pp.777.784.

- : The importance of the otoliths in diso-

rientation. Aero.Medic. I964. 35. pp.874.877.

- JOHNSON W.H. , STUBBS R.A. and al. : Stimulus required to produce motion rickness.I. preliminary report dealing with importance of head movement. Jour. Av. Médic. I95I.22.p.365.

- JOHNSON W.H. and TAYLOR N.B.G. : Some experiments on the relative effectiveness of varions types of accelerations on motion rickness: Aero. Médic. I96I. 32 p.205.

- JOHNSON W.H. , MONEY K.E. and GRAYBIEL A. : Some vestibular responses pertaining to space travel. Sympo on the role of the vestibular organs on the exploration of space. U.S. Naval School of Av. Médic. Pensacola Fla. 20-22 Janvier I965 p.2I5.

- JONES G.M. : Vestibular inaptitude in the environments of flight and space. Jour. of. Laryng. otol. Mars I966. 80 N° 3 pp.207-22I.

- From land to space in a génération an evolutionary Challenge. Aero. Médic. Déc. I968. Vol.39. N° I2.p.I27

- JONGKEES L.B.W and GROEN J.J. : The nature of the vestibular stimulus. J. Laryng. I946. 6I. p.529.

- JONGKEES L.B.W. and PHILIPSZOON A.J. : Nystagmus provoked by linear accelerations. Acta. Physio. Pharmaco. Néer I962. IO p.239.

- JONGKEES L.B.W. , OOSTERVELD W.S. ans ZELING S. : On nystagmus provoked by central stimulation. Acta oto laryng. (Stockh.) I964. 57. p.3I3.

- JONGKEES L. : How to examine the otolits. Ann. otol. (St Louis) I966 t.75 N° 5 pp.764-771.

- KELLOGG R.S. : Dynamic counterrolling of the eye in normal subjects and in persons with biletaral labyrinthine defects. Sympo. on the role of the vestibular organs in the exploration of space. U.S. Nerval School of Av. Médic.Pensacola. Fla. 20-22 Janv. I965 p.I95.

- KELLOGG R.S. , KENNEDY R.S. and GRAYBIEL A. : motion rickness symptomatology of labyrinthine defective and normals subjects during zero. gravity maneuvers. Aero. Médic.I965 36. pp.3I5-3I8.

KELLOG R.S. and GRAYBIEL A. : lack of response to thermal stimulation of the semi-circular canals on the weightless phase of parabolic flight. Aero. Médic. Mai I967.38. p.487.

- KENNEDY R.S. and GRAYBIEL A. : Symptomatology during prolonged exposure on a constant ly rotating environment at velocity of one revolution per minute. Aero.Médic. I962 pp. 8I7.825.

- KITAHARA M. and UNO R. : Equilibrium and vertigo on a tilting environment. Ann. Oto. (St Louis) I967. t.76.N°1 pp.I66-I78.

- KRAUS R.N. : Evaluation of simple Coriolis test fa vestibular sensitwity. Aero.Médic. I960. 3I. pp.852-859.

- LANSBERG M.P. : The modulating influence of the otolith organs on semi circular functions. Sympo. on the role of the vestibular organs in the exploration of space. U.S. Naval School of Av. Médic. Pensacola .Fla.20-22 Janv.I965 p.69.

- LANSBERG M.P., FRED E. GUEDRY Jr. and GRAYBIEL A. : Effect of changing resultant linear acceleration relative to the subject on nystagmus generated by angular acceleration Aero.Médic. Mai I965. 36. p.456.

LEGENT F. PERLEMUTER L., VANDENBROUCK C. : Cahiers d'anatomie O.R.L. T. 1 Ed. Masson I968.

- LORENTE de NO R. : AUSGCRVÄHLTE Kapitel aus der vergleichenden physiologie des lab rinthes. Ergebn. physiol. I93I. 32 p.73.

- LORENZ W. : Dic bedentung des hörorgans für das fliegenden tier und den fliegenden menschen. Z. Laryng. rhino. I968. 47. 6 pp.397-408.

- LOWENSTEIN O. : Peripheral mechanisms of equilibrium. Brit. Med. Bull. I956. I2. p.II4

- LOWENSTEIN O. and ROBERTS T.D. : The equilibrium function of the otolith organs of the thornback ray (Raja Clavata) J. Physiol. I950. IIO. p.392.

- Mac CABE B.F. : Vestibular suppression on figure skaters. Trans. Amer. Acad. Ophtal. and Otolaryng.Oct. I959.

- : Nystagmus response of the otolith organs Laryngoscope . I964 74. p.372.

- Mac CABE B.F., GILLINGHAM K. and al. : The mechanism of vestibular suppression. Ann. otol. (St Louis) I964. t.73 N° 3 pp.8I6-828.

- Mac NALLY W.J. : Some fact and fancies about the utricle. Ann. Otol. I955 64. p.355.

- Mac NALLEY W.H. and STUART G. : Physiology of the labyrinth reviewed on relation to seasickness and other forms of motion rickness. War Med. I942. 2. p.683.

- MALCIK V. : Performance decrement in a flight simulator due to galvanic stimulation of the vestibular organ and

its validity for success on flight training. Aero. Médic. Sept. I968. Vol. 39 p.94I.

- MASPETIOL R. et SEMETTE : Notes sur l'habituation vestibulaire. Son intérêt clinique. Ann. otolaryng. (Paris) I963. t.80. N° 4-5 pp. 309-3I6.

- MAULSBY R.L. : Electro encephalogram during orbital flight . Aero. Médic. Ocot. I966. vol.37 N° IO p. I028.

- MEDA F. : A research on the threshold for the Coriolis and Purkinje phenomena of excitation of the semi-circular canals. Arch. di Fisiol. I952.

- MILLER E.F. : Counterrolling of the human eyes produced by head tilt with respect to gravity . Acta. oto. laryng. (Stockh.) I96I. 54. Pp. 479-50I.

- MILLER E.F. and GRAYBIEL A. Role of the otolith organs in the perception of horizontality. Amer. J. Psychol. I966 79. p.24.

- : Comparison of autokinetic movement perceived by normal persons and deaf subjects with bilatéral labyrinthine defects. Aero. Médic. I966 33. P. I077.

- : A comparison of ocular counterroling movements between normal persons and deaf subjects with bilatéral labyrinthine defects. Ann. Octol.I963.72.p.885

- MILLER E.F., GRAYBIEL A. and KELLOGG R.S. : Otolith organ activity within earth standard, one half-standard and zero gravity environments. Aero.Médic. Avr.I966. vol. 37. N° 4 p.399.

- MILOGEVIC B. Influence of the otoliths on the duration of post caloric nystagmus. Sympo. on the role of the vestibular organs in space. U.S. Naval School of Av. Médic. Pensacola. Fla. 20-22 Janv. I965 p.77.

- MONTANDON A. : Qu'entend-on aujourd'hui par "Vestibulométrice" . Med. et Hyg. (Genève) I968. 26. 843 p. II99.

- : Problèmes de Cosmonautique. Med. et Hyg. -Genève- I964. t. 22. N° 657. p.82I.

- : Nystagmographie. Encycl. Méd. Chir.ORL

- NIVEN J.I., HIXSON W.C. and Correia M.J. : Elicitation of horizontal nystagmus by periodic linear acceleration Acta. oto laryng. (Stockh.) Oct. I966. tome 62.

- OOSTERVELD W.J. and VAN DER LAARSE W.D. : Effect of gravity on vestibular nystagmus Aero.Medic.Avril I969. Vol. 40 N° 4 p.382

- OWADA . K.and OKUBO K : The otolithic reaction on nystagmus by caloric stimulations. Acta. oto laring. (Stockh.) I963. suppl. I79.

- OWADA K., SHIIZU S. and KIMURA K. : The influence of the utricle on nystagmus. Acta oto laryng. (stockh.) I960 52. p.2I5.

- PARIN V.V. : Some important problems of space physiology. Aero. Medic. sept. I969 Vol. 40 N° 9 p.I009.

- PHILIPSZOON A.J. : Some experiments on the function of the labyrinth. Pract. Otorhinolaryng. (Basel) I962. 24. p.344.

- PIALOUX P. : La physio pathologie de l'équilibre chez l'aviateur. Journées Libanaises de Médec. Aéro. I4.I5 Nov.I963.

- PIALOUX P, BURGEAT M. et FONTELLE P. : l'Absence de pesanteur et la fonction vestibulaire. ATTI del XVII Conventus della Societas O.R.L. Latina. Catania. I968.

- PIALOUX P. et BURGEAT M. : Etude expérimentale du nystagmus vestibulaire à la suite d'agressions cinétiques. Acta oto laryng. (Stockh.) I967 t.63. N° 2.3. pp. 2I6-22I.

- PICHLER H.J. : Otologische Fragen der Raumfahrt. Mschr Ohren. Laryngo. Rhino. I966. I00. N° 6. pp.264-272.

- ROSS H.E. , CRICKMAN S.D., SILLS N.V. and ORVEN E.P.: Orientation to the vertical in free divers. Aero. Medic. Juillet I969. Vol. 40. N° 7.

- SASAKI H. YAMAGATA M. et al. : la fonction des organes à otolithe. Congrès inter. O.R.L. (Tokyo) I965. t.8.p.74.

- SCHMALTZ G. : The physical phenomena occuring in the semi circular canals during rotatory and thermic stimulation J. Laryng. I932. 47.p.35.

- SCHUBERT G. : Labyrinthreizung durch zusatz beschleunigung bei Ein wirkung von zentrifugalkaft. Pflueger Arch. Ges. physio. I934. 233. p.537.

- : Coriolis. Nystagmus Jour. Av.Médic. Juin I954. 25. pp.257-259.

- SCHUKNECHT H.F. : Positional vertigo : clinical and experimental observations. Trans. Amer. Acad. Ophtal. Otol.I962 66. p.3I9.

- SHAW C.C. : On the dynamics of motion sickness. Scient. Monthly Fev. I954. 77. p.II0.

- SMITH J.B. and JOHNSON W.H. : Direct nerve stimulation of the components of the nonauditory labyrinth of the cat. Ann.

Otol. Thinol. and laryngol. Déc. I963. 72. pp.II02.II08

- SPENDLIN H. , SCHUKNECHT H.F. and GRAYBIEL A. : Ultrastructure of the otolith organs in squiriel monkeys after exposure to nigh levels of gravitational force. Aero. Médic. Juin I965. 36. N° 6 p.497.

- THACH J.S. and GRAYBIEL A. : Bechavioral responses of unrestrained normal and labyrinthectomized squiriel monkeys to repeated zero-gravity parabolic flights. Aero. médic. Juil. I968. Vol 39. p.734.

- TOROK N. : Nystagmus parameters of various rotatoring stimuli. Acta otolaryng. (Stockh.) Aout I965. 62. p.I09.

- TYLER D.B. and Bard P. : Motion rickness. Physiol. Rev. I949. 29. p.3II.

- ULRICH H. : Dic funktion des otolithen gepruft direkte mechanische beeinflussung des utriculusotolithen am lebenden hecht. Arch. Ges. Physio. I934. 235 p.545.

- USELER J.W. and ALGRANTI J.S. : Pilotreaction to high speed rotation. Aero. Medic. I963. 34. p.50I.

- VERSTEEGH C. : Ergebnisse partiellen labyrinthexstirpation bei kaninchen. Acta. oto.laryng. (Stockh.) I927 11.393.

- VON BECKH H.J.A. : Experiments with animals and human subjects under sub and séro-gravity conditions during the dive and parabolic flight. J. Av. Medic. I954.25. p.235.

- VON DIRINGSHOFEN H. : Flugmedizinische Problème der Gervichtslosskeit. Münch. Med. Wschr. 3I Juil. I959.IOI.N° 3I pp.I326-I328; et du 7 aout I959 IOI. N° 32 pp.I345-I349.

- VON EGMOND A.A.J. , GROEN J.J. and JONGHEES L.B.W. : The mechnics of semi-circular canals. J. Physiol.I949 IIO p.I

- : The function on the vestibular organ. Pract. Otorhinolaryng. (Basel) I952 I4. Suppl. 2.

- WALSCH E.G. : Perception of linear motion following unilatéral labyrinthectomy variation of threshold according to orientation of the head. J. Physiol. I960. I53. p.350.

- : Role of the vestibular apparatus in the perception of motion in a parralel swing. J. Physiol.I95I. I55. p.506.

- WEAVER R.S. : The oretical aspects of the role of angular acceleration in vestibular stimulation. Acta oto laryng. (Stockh.) I965 suppl. 205.

- WOELLNER R.C. and GRAYBIEL A. : The loss of counterroling of the eyes in three persons personnally without functionnal otoliths organs. Ann. Otol. I960 69. pp. I006-I0I2.

- : A vierv and objective method for measuring ocular torsion. Amer. J. Ophtal. I959. 47. pp. 349-352.

- : Counterroling of the eyes and its dépendance on the magnitude of positional on initial force acting laterally on the body J. appl. Physio. I959. p.632.

- YUGANOV E.M. , GORSHKOV A.I. , KAZYAN I.I. , BRYANOV I.I., KOLOSOV I.A. and al : Vestibular reactions of cosmonauts during the flight in the " Voskhod" space ship. Aero. Medic. Juill. I966 pp.69I- 694.